

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра приладів і систем орієнтації та навігації

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

Бурау Н.І.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

« ____ » _____ 2019 р.

Дипломна робота

освітньо-кваліфікаційного рівня « бакалавр »
(назва ОКР)

з напрямку підготовки *151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»*
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему: *Методичне забезпечення до дисципліни
"Мікроелектромеханічні прилади та системи"*

Виконав: III курсу, групи ПГ-п61
студент
(шифр групи)

Шуляк Максим Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник асистент, Сапегін.О.М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2019 рік

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект присвячений розробці методичних вказівок до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Мікроелектромеханічні прилади та системи». Методичні вказівки розроблені для восьми лабораторних робіт. Передбачається використання сучасних інерціальних MEMS датчиків та проведення імітаційного моделювання. Лабораторні роботи передбачають ознайомлення з принципами роботи MEMS акселерометра та гіроскопа, їх підключення до ПК та отримання вихідних сигналів у середовищах Arduino IDE і Matlab. Створено необхідне програмне забезпечення для проведення циклу лабораторних робіт.

Пояснювальна записка містить 70 сторінки, 51 рисуноків, лістинги програм.

Ключові слова: Arduino, Matlab, MEMS, ADXL335, кутомір, мікромеханічний гіроскоп, ІВМ.

АННОТАЦИЯ

Дипломный проект посвящен разработке методических указаний к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Микроэлектромеханические приборы и системы». Методические указания разработаны для восьми лабораторных работ. Предполагается использование современных инерциальных МЭМС датчиков и проведения имитационного моделирования. Лабораторные работы предусматривают ознакомление с принципами работы МЭМС акселерометра и гироскопа, их подключение к ПК и получения выходных сигналов в средах Arduino IDE и Matlab. Создано необходимое программное обеспечение для проведения цикла лабораторных работ.

Пояснительная записка содержит 70 страниц, 51 рисунок, листинги программ.

Ключевые слова: Arduino, Matlab, МЭМС, ADXL335, угломер, микромеханический гироскоп, ИВМ.

ABSTRACT

The diploma project is devoted to the development of guidelines for the implementation of laboratory works on the discipline "Microelectromechanical devices and systems". Methodical instructions are developed for eight laboratory works. It is planned to use modern inertial MEMS sensors and simulation. Laboratory work includes familiarization with the principles of MEMS accelerometer and gyroscope operation, their connection to the PC and reception of output signals in Arduino IDE and Matlab environments. The necessary software for the cycle of laboratory work is created.

Explanatory note contains 70 pages, 51 figures, listings of programs.

Keywords: Arduino, Matlab, MEMS, ADXL335, inclinometer, micromechanical gyroscope, IMU.

ЗМІСТ

ВСТУП	15
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1	17
ПІДКЛЮЧЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ЗА ДОПОМОГОЮ ARDUINO IDE.....	17
1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	17
1.1 Мікромеханічний акселерометр	17
1.2 Модель вихідного сигналу датчика.....	18
1.3 Підключення акселерометра ADXL 335 до Arduino	18
1.4 Програмне забезпечення	21
1.5. Лабораторна установка.....	21
2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:.....	23
3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	23
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2	24
ПІДКЛЮЧЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ЗА ДОПОМОГОЮ MATLAB.....	24
1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	24
1.1 Мікромеханічний акселерометр.....	24
1.2 Модель вихідного сигналу датчика.....	25
1.3 Підключення акселерометра ADXL 335 до Arduino	25
1.4 Програмне забезпечення	28
1.5. Лабораторна установка.....	28
2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:.....	30
3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	30

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3	31
КУТОМІР НА ОСНОВІ МЕМС АКСЕЛЕРОМЕТРА.....	31
1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	31
1.1 Мікромеханічний акселерометр.....	31
1.2 Модель вихідного сигналу датчика.....	32
1.3 Схема побудови кутоміру	32
1.4 Підключення акселерометра ADXL 335 до Arduino	33
1.5 Програмне забезпечення	36
1.6 Лабораторна установка.....	36
2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:.....	38
3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	38
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4	40
ВИМІРЮВАННЯ ДОЦЕНТРОВОГО ПРИСКОРЕННЯ	40
1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	40
1.1 Мікромеханічний акселерометр.....	40
1.2 Модель вихідного сигналу датчика.....	41
1.3 Прискорення при обертальному русі основи	41
1.4 Підключення акселерометра ADXL 335 до Arduino	42
1.5 Програмне забезпечення	45
1.6 Лабораторна установка.....	45
2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:.....	47
3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	47
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5	48
ПІДКЛЮЧЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПА ЗА ДОПОМОГОЮ ARDUINO IDE.....	48

1	ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	48
1.1	Мікромеханічний гіроскоп.....	48
1.2	Модель вихідного сигналу датчика.....	48
1.3	Підключення гіроскопа MPU6050 до Arduino.....	49
1.4	Програмне забезпечення.....	51
1.6	Лабораторна установка.....	53
2.	ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:.....	54
3.	КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	54
	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6	55
	ПІДКЛЮЧЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПА ЗА ДОПОМОГОЮ MATLAB	55
1.	ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	55
1.1	Мікромеханічний гіроскоп.....	55
1.2	Модель вихідного сигналу датчика.....	55
1.2	Підключення гіроскопа MPU6050 до Arduino.....	56
1.3	Програмне забезпечення.....	58
1.4	Лабораторна установка	59
2.	ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:.....	61
3.	КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	61
	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7	62
	МОДЕЛЮВАННЯ ОСЬОВОГО МІКРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА	62
1.	ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	62
1.1	Математична модель	62
1.2	Конструктивна схема	63

2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ	66
3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	66
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8	67
МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПА	67
1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	67
1.1 Математична модель	67
1.2 Конструктивна схема	68
2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ	72
3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	72
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	74

ВСТУП

Сучасне приладобудування розвивається відповідно до еволюції матеріальної бази та технології виробництва. Розвиток електроніки та підвищення потужності обчислювальних засобів дозволяє у багатьох випадках відмовитись від класичних «залізних» чутливих елементів (ЧЕ). Більш того, сучасні задачі орієнтації, управління та діагностики вимагають мініатюрних, дешевих, та енергоефективних ЧЕ.

З середини XX століття проводяться розробки мініатюрних датчиків на основі кремнію (silicon), який є основним матеріалом мікроелектроніки. Широке застосування кремнію привело до стрімкого розвитку технології його обробки, що дозволило значно розширити спектр його можливого застосування. Стало можливим створювати на одному кристалі одночасно чутливі елементи, перетворюючі та електронні компоненти.

У системах навігації, стабілізації і наведення усіх рухомих об'єктів основними датчиками первісної інформації про кутові, а інколи і про лінійні переміщення об'єкту є гіроскопічні прилади різних типів і акселерометри. З розвитком мікроелектронних технологій у дійсний час стало можливим використання їх для створення мініатюрних інерційних вимірювачів, що отримали назву мікромеханічних.

Освоєння технології виготовлення 3D механічних структур з використанням устаткування, вживаного в мікроелектроніці, відкрило шлях до створення надмініатюрних електромеханічних систем. Це новий напрям в області приладобудування отримав назву технології МЕМС (мікроелектромеханічних систем). Найбільш складними пристроями МЕМС є мікромеханічні гіроскопи (ММГ).

Кількість галузей застосування мікромеханічних інерційних датчиків надзвичайно велика. Мікромеханічні датчики первісної інформації дозволяють створювати малогабаритні інерційні навігаційні системи,

інтегровані із супутниковими навігаційними системами, що забезпечують необхідну точність визначення положення та орієнтації різних рухомих об'єктів: аерокосмічних літальних апаратів, морських суден, наземних транспортних засобів, робототехнічних комплексів. До нетрадиційних застосувань мікромеханічних гіроскопічних приладів можна віднести системи віртуальної реальності (датчики первісної інформації про керуючі параметри руху оператора), інтелектуальні іграшки, самокеровані снаряди і кулі [1-3].

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

ПІДКЛЮЧЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ЗА ДОПОМОГОЮ ARDUINO IDE

Мета роботи: ознайомлення з мікромеханічним аналоговим акселерометром ADXL 335; формування програмного алгоритму для підключення та отримання сигналів з акселерометра за допомогою Arduino IDE.

1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Мікромеханічний акселерометр

Equation Section (Next)Equation Chapter (Next) Section 1

Акселерометр – прилад який вимірює проекцію уявного прискорення на свою вісь чутливості [2-3].

Кінематична схема осьового акселерометра зображена на рис.1.1. Тут позначені: 1 – корпус, 2 – демпфуюче середовище, 3 – інерційна маса або чутливий елемент акселерометра, 4,5 – пружний підвіс, вісь x – вісь чутливості.

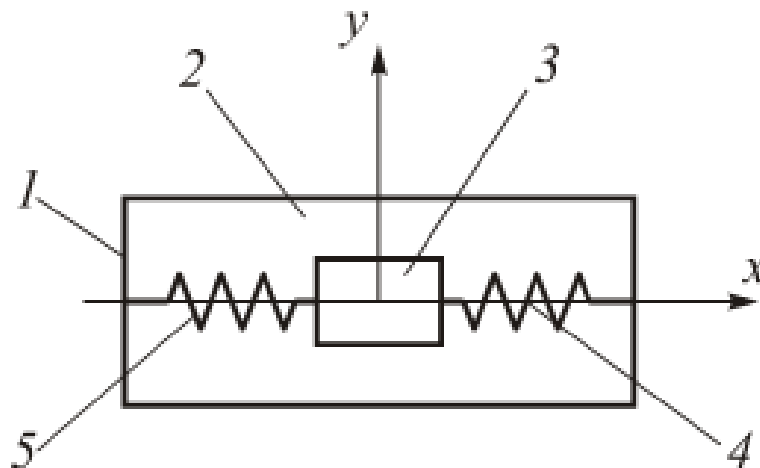


Рис.1.1 Схема осьового акселерометру

1.2 Модель вихідного сигналу датчика

Модель вихідного сигналу акселерометра можна спрощено записати у вигляді [2]:

$$a = K^{-1}(U - U_0), \quad (1.1)$$

де позначено U – вихідна напруга акселерометра, K – масштабний коефіцієнт, U_0 – нульовий сигнал акселерометра.

Проведемо розрахунок масштабного коефіцієнта та зміщення нуля методом тестових поворотів.

$$K = \frac{(U_1 - U_2)}{2g}, \quad (1.2)$$

де U_1 та U_2 – напруга при додатному та від'ємному напрямі g ; g – прискорення вільного падіння.

Зміщення нуля можливо визначити за наступною формулою:

$$U_0 = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}{4}, \quad (1.3)$$

де U_i – напруга на кожному сегменті

1.3 Підключення акселерометра ADXL 335 до Arduino

На рис. 1.2 показано загальний вигляд аналогового мікромеханічного акселерометра ADXL 335. Нижче наведені його основні характеристики.

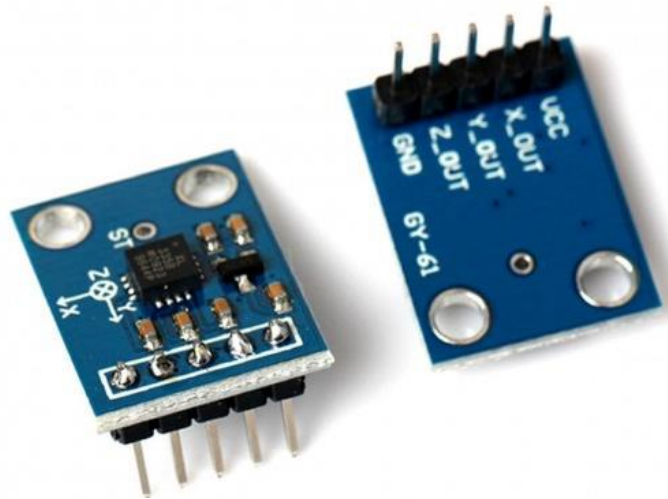


Рис.1.2 Акселерометр ADXL-335

Основні характеристики:

- Вимірювання по трьом осям;
- Мініатюрний пластиковий корпус LFCSP, 4 мм × 4 мм × 1.45 мм;
- Малий струм споживання: 350 мкА;
- Живлення від 1.8 В до 3.6 В;
- Ударні навантаження до 10000 g;
- Висока температурна стабільність;
- Регулювання ширини полоси за допомогою одного конденсатора на вісь;
- Відповідає вимогам RoHS/WEEE.

Підключення акселерометру виконувалося за допомогою мікроконтролера **Arduino Nano**.

Arduino Nano V3Nano – одна з найбільш мініатюрних плат Arduino. Вона є повним аналогом Arduino Uno – так само працює на чіпі ATmega328P (хоча можна ще зустріти варіанти з ATmega168), але з меншим форм-фактором. Через своїх габаритні розміри плата часто використовується в проектах, в яких важлива компактність. На платі відсутнє винесене гніздо зовнішнього живлення, Ардуіно працює через інтерфейс USB (miniUSB або microUSB).

Схема мікроконтролера приведена на рис.1.3

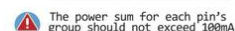
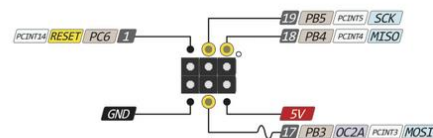


Схема підключення ADXL335 до плати Arduino Nano наведено нижче на

20

1.4 Програмне забезпечення

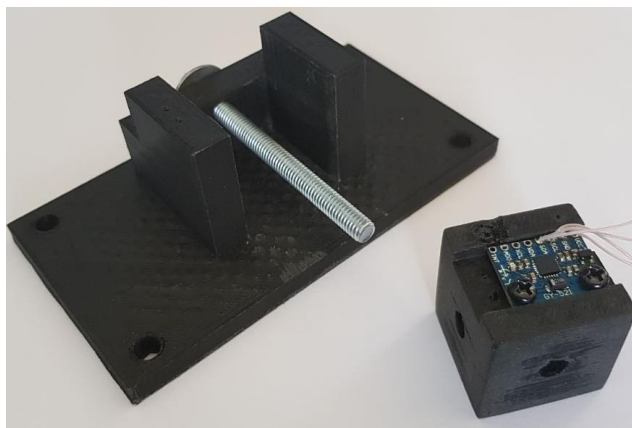
Для підключення акселерометру та отримання вихідного сигналу скористаємося програмним середовищем **Arduino IDE**. Акселерометр ADXL335 являється аналоговим приладом, тому для його підключення достатньо використати стандартний приклад з бібліотеки Arduino IDE – *AnalogReadSerial*:

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
}  
void loop() {  
  int sensorValue = analogRead(A0);  
  Serial.println(sensorValue);  
  delay(1);  
}
```

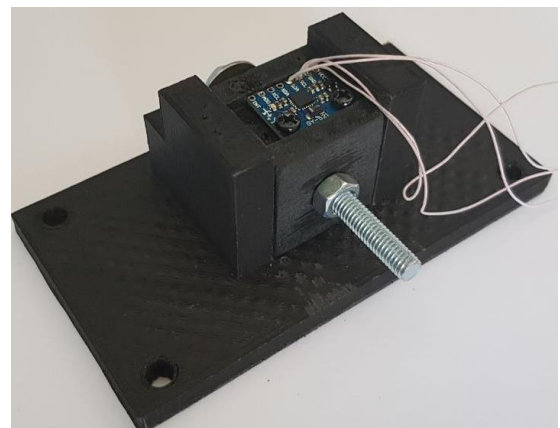
Приведена процедура забезпечує отримання аналогового сигналу (напруги) за допомогою команди *analogRead* з порту (A0).

1.5. Лабораторна установка

Лабораторна робота виконується на оптичній ділильній головці (ОДГ), яку показано на рис.1.5 – 1.6. Акселерометр встановлено на ОДГ за допомогою спеціальної оснастки.



а)



б)

Рис. 1.5. Чутливий елемент на оснастці

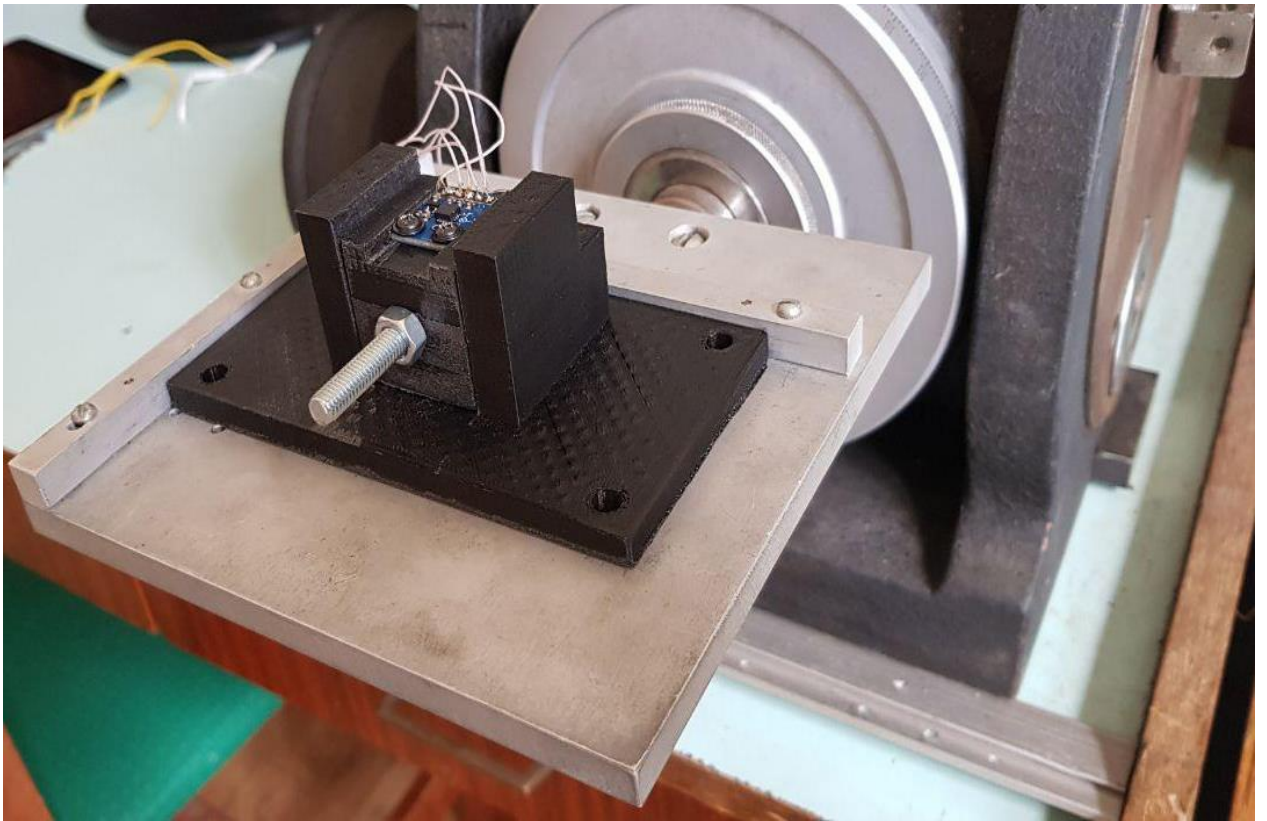


Рис.1.6 ОДГ за встановленим акселерометром

Використання оснастки дозволяє встановити довільне положення осей чутливості акселерометру на ОДГ за вказівкою викладача.

2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Встановити акселерометр на платформі ОДГ.
2. Підключити акселерометр за схемою по рис.1.4;
3. Створити і зберегти новий проект у середовищі Arduino;
4. Написати програму для Arduino для отримання аналогового сигналу з акселерометру;
5. Почати запис сигналу з акселерометра;
6. Виконати повний оберт платформи ОДГ з акселерометром навколо заданої викладачем осі. При цьому, утримувати платформу ОДГ на 10-20 секунд при кожному повороті на 90 град.
7. Припинити запис сигналу з акселерометра.
8. Розрахувати параметри акселерометра за (1.2) та (1.3);
9. Відкалібрувати акселерометр за (1.1).
10. Побудувати графік вихідної величини акселерометра при обертанні платформи. Побудувати відповідний графік зміни прискорення.
11. Оформити звіт.

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке акселерометр? Його призначення?
2. Які є типи акселерометрів ?
3. За принципом вимірювання акселерометри діляться на ... ?
4. Особливості роботи і характеристики акселерометра ADXL335.
5. Схема підключення акселерометра ADXL335.
6. Як можна задати вимірювальну вісь акселерометра у програмному середовищі Arduino IDE? На що впливає параметр delay?
7. Що таке зміщення нуля і масштабний коефіцієнт акселерометра?
8. Від чого залежить точність визначення прискорення акселерометром?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ПІДКЛЮЧЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ЗА ДОПОМОГОЮ MATLAB

Equation Chapter 2 Section 2

Мета роботи: ознайомлення з мікромеханічним аналоговим акселерометром ADXL 335; формування програмного алгоритму для підключення та отримання сигналів з акселерометра за допомогою Matlab.

1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Мікромеханічний акселерометр

Акселерометр – прилад який вимірює проекцію уявного прискорення на свою вісь чутливості.

Кінематична схема осьового акселерометра зображена на рис.2.1. Тут позначені : 1 – корпус, 2 – демпфуюче середовище, 3 – інерційна маса або чутливий елемент акселерометра, 4,5 – пружний підвіс, вісь x – вісь чутливості.

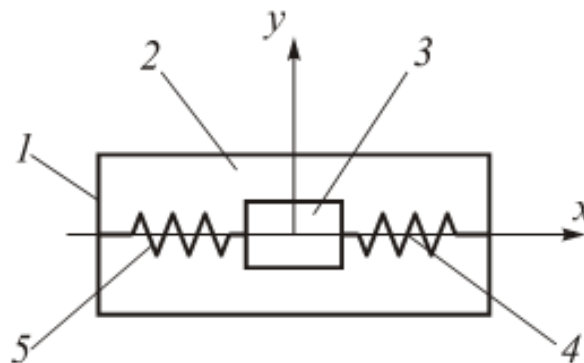


Рис.2.1 Схема осьового акселерометру

1.2 Модель вихідного сигналу датчика

Модель вихідного сигналу акселерометра можна спрощено записати у вигляді:

$$a = K^{-1}(U - U_0), \quad (2.1)$$

де позначено U – вихідна напруга акселерометра, K – масштабний коефіцієнт, U_0 – нульовий сигнал акселерометра.

Проведемо розрахунок масштабного коефіцієнта та зміщення нуля методом тестових поворотів.

$$K = \frac{(U_1 - U_2)}{2g}, \quad (2.2)$$

де U_1 та U_2 – напруга при додатному та від'ємному напрямі g ; g – прискорення вільного падіння.

Зміщення нуля можливо визначити за наступною формулою:

$$U_0 = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}{4}, \quad (2.3)$$

де U_i – напруга на кожному сегменті

1.3 Підключення акселерометра ADXL 335 до Arduino

На рис. 2.2 показано загальний вигляд аналогового мікромеханічного акселерометра ADXL 335. Нижче наведені його основні характеристики.

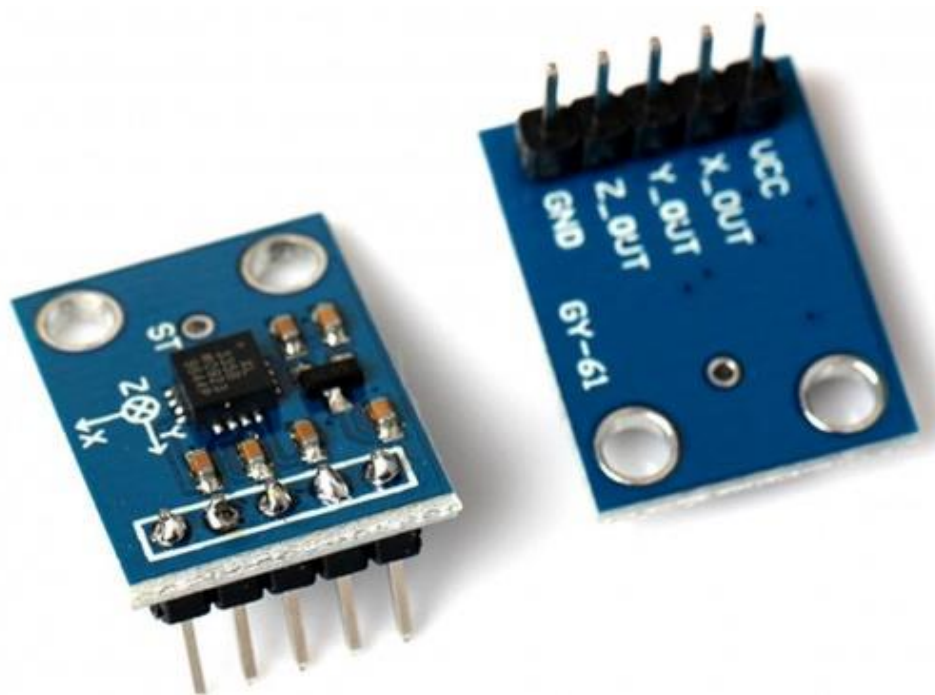


Рис.2.2 Акселерометр ADXL-335

Основні характеристики:

- Вимірювання по трьом осям;
- Мініатюрний пластиковий корпус LFCSP, 4 мм × 4 мм × 1.45 мм;
- Малий струм споживання: 350 мкА;
- Живлення від 1.8 В до 3.6 В;
- Ударні навантаження до 10000 g;
- Висока температурна стабільність;
- Регулювання ширини полоси за допомогою одного конденсатора на вісь;
- Відповідає вимогам RoHS/WEEE.

Підключення акселерометру виконувалося за допомогою мікроконтролера **Arduino Nano**.

Arduino Nano V3Nano – одна з найбільш мініатюрних плат Arduino. Вона є повним аналогом Arduino Uno – так само працює на чіпі ATmega328P (хоча можна ще зустріти варіанти з ATmega168), але з меншим форм-фактором. Через своїх габаритні розміри плата часто використовується в проектах, в яких

важлива компактність. На платі відсутнє винесене гніздо зовнішнього живлення, Ардуіно працює через інтерфейс USB (miniUSB або microUSB).

Схема мікроконтролера приведена на рис.2.3

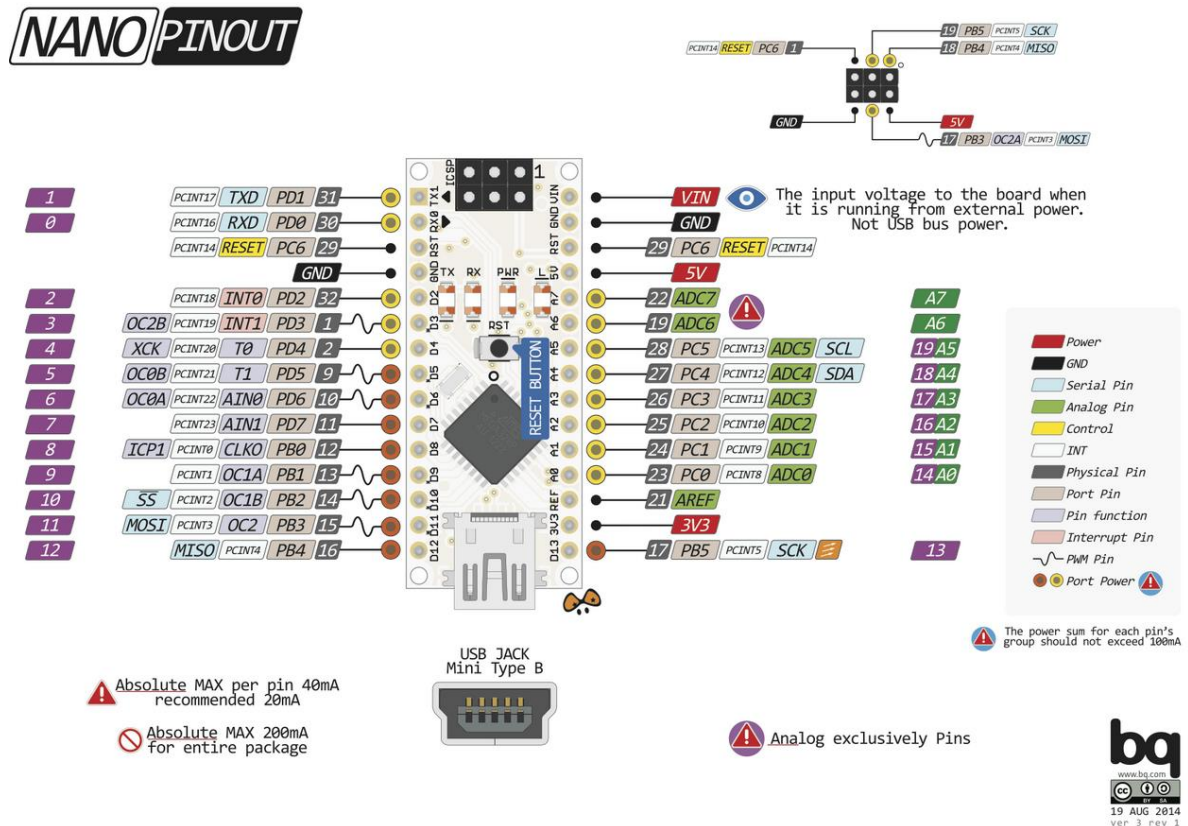


Рис.2.3 Arduino Nano

Схема підключення ADXL335 до плати Arduino Nano наведено нижче на рис.2.4.

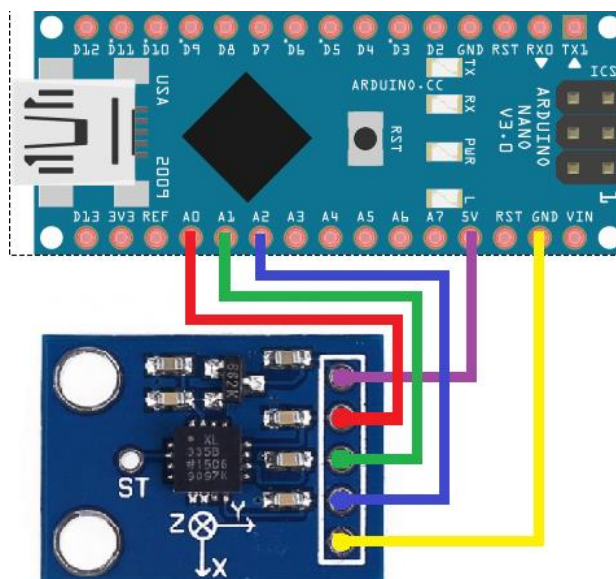


Рис. 2.4 Схема підключення

1.4 Програмне забезпечення

Для підключення акселерометру та отримання вихідного сигналу скористаємося програмним середовищем **Matlab**. Для цього необхідно встановити набір додаткових процедур *Matlab Arduino Hardware Support Packages*.

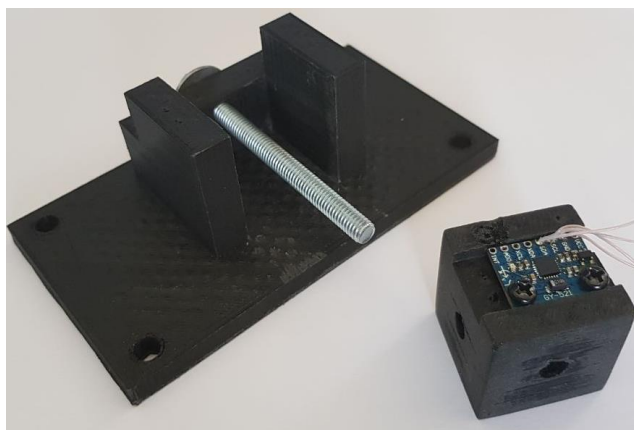
Текст програми, що ініціалізує підключення до Arduino та отримання сигналу з датчика приведено нижче.

```
clc, clear all
a=arduino('COM9','Nano');
t=1; Tk=100000;
for t=1:Tk
    Uz(t)=readVoltage(a,'A2');
    t=t+1;
end
```

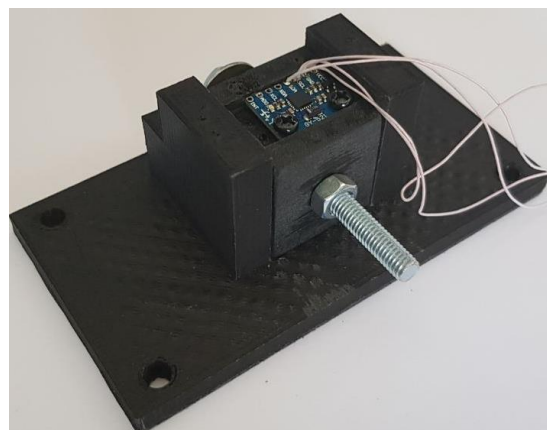
Приведена процедура забезпечує отримання аналогового сигналу за допомогою команди **readVoltage** з порту (A2).

1.5. Лабораторна установка

Лабораторна робота виконується на оптичній ділильній головці (ОДГ), яку показано на рис.2.5 – 2.6. Акселерометр встановлено на ОДГ за допомогою спеціальної оснастки.



а)



б)

Рис. 2.5. Чутливий елемент на оснастці

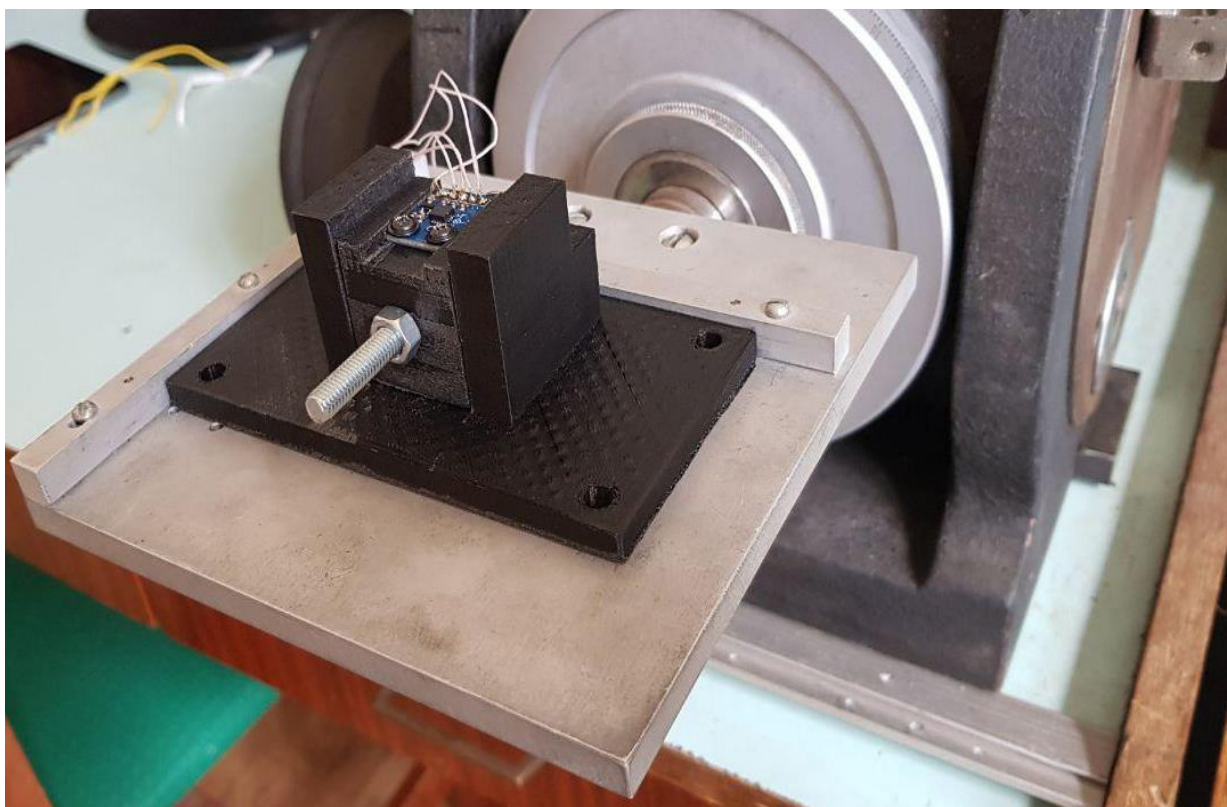


Рис.2.6 ОДГ за встановленим акселерометром

Використання оснастки дозволяє встановити довільне положення осей чутливості акселерометру на ОДГ за вказівкою викладача.

2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Встановити акселерометр на платформі ОДГ.
2. Підключити акселерометр за схемою по рис.2.4;
3. Написати програму для Arduino для отримання аналогового сигналу з акселерометру у середовищі Matlab;
4. Почати запис сигналу з акселерометра;
5. Виконати повний оберт платформи ОДГ з акселерометром навколо заданої викладачем осі. При цьому, утримувати платформу ОДГ на 10-20 секунд при кожному повороті на 90 град.
6. Припинити запис сигналу з акселерометра.
7. Розрахувати параметри акселерометра за (2.2) та (2.3);
8. Відкалібрувати акселерометр за (2.1).
9. Побудувати графік вихідної величини акселерометра при обертанні платформи. Побудувати відповідний графік зміни прискорення.
10. Оформити звіт;

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке акселерометр? Його призначення ?
2. Які є типи акселерометрів ?
3. За принципом вимірювання акселерометри діляться на ... ?
4. Особливості роботи і характеристики акселерометра ADXL335.
5. Схема підключення акселерометра ADXL335.
6. Як можна задати вимірювальну вісь акселерометра у програмному середовищі Matlab? Чи необхідно вказувати модель плати та номер порту при ініціалізації Arduino?
7. Що таке зміщення нуля і масштабний коефіцієнт акселерометра?
8. Від чого залежить точність визначення прискорення акселерометром?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

КУТОМІР НА ОСНОВІ МЕМС АКСЕЛЕРОМЕТРА

Мета роботи: Формування програмного алгоритму для розрахунку кута нахилу основи за сигналами з мікромеханічного акселерометра.

1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Equation Section (Next)Equation Chapter (Next) Section 3

1.1 Мікромеханічний акселерометр

Акселерометр – прилад який вимірює проекцію уявного прискорення на свою вісь чутливості [2-3].

Кінематична схема осьового акселерометра зображена на рис.3.1. Тут позначені: 1 – корпус, 2 – демпфуюче середовище, 3 – інерційна маса або чутливий елемент акселерометра, 4,5 – пружний підвіс, вісь x – вісь чутливості.

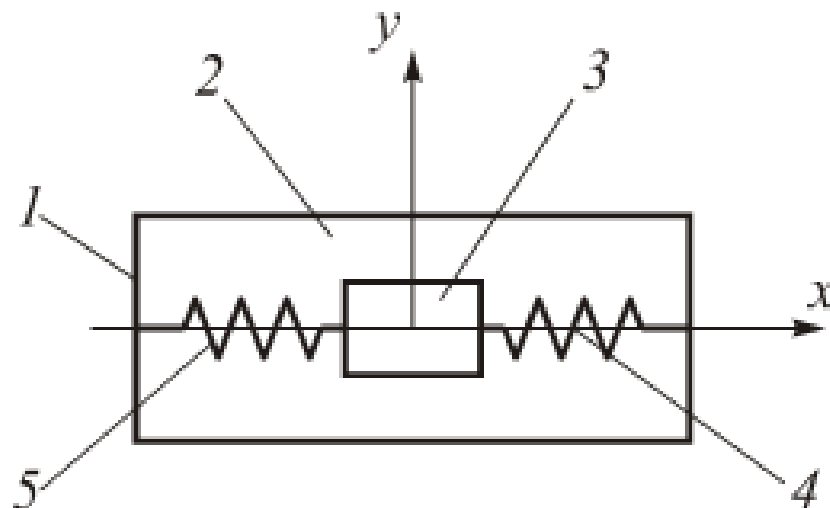


Рис.3.1 Схема осьового акселерометру

1.2 Модель вихідного сигналу датчика

Модель вихідного сигналу акселерометра можна спрощено записати у вигляді:

$$a = K^{-1}(U - U_0), \quad (3.1)$$

де позначено U – вихідна напруга акселерометра, K – масштабний коефіцієнт, U_0 – нульовий сигнал акселерометра.

Проведемо розрахунок масштабного коефіцієнта та зміщення нуля методом тестових поворотів.

$$K = \frac{(U_1 - U_2)}{2g}, \quad (3.2)$$

де U_1 та U_2 – напруга при додатному та від'ємному напрямі g ; g – прискорення вільного падіння.

Зміщення нуля можливо визначити за наступною формулою:

$$U_0 = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}{4}, \quad (3.3)$$

де U_i – напруга на кожному сегменті

1.3 Схема побудови кутоміру

Використовуючи принцип роботи акселерометру, можна визначити кут між його віссю чутливості та вертикаллю (напрямом вектору g).

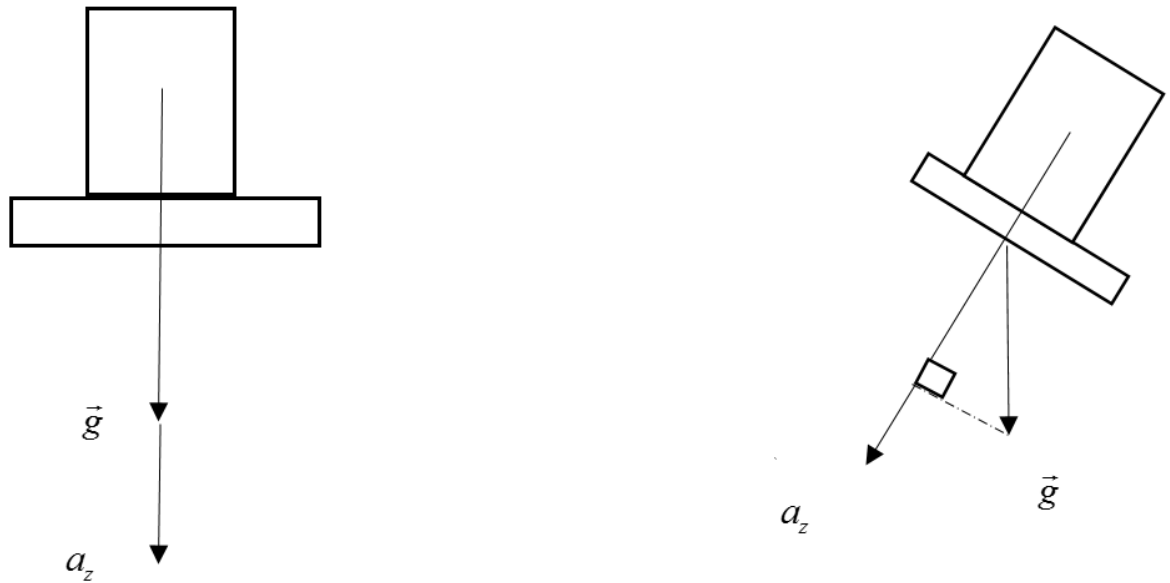


Рис. 3.2 Принцип роботи кутоміру

Нехай акселерометр встановлено на ОДГ як показано на рис.3.2. Спочатку його вісь чутливості z направлена по вертикалі місця, тому він вимірює прискорення $a_z = g$. Якщо ОДГ повернути на кут φ , то акселерометр буде вимірювати проекцію $a_z = g \cdot \tan \varphi$. Знаючи величину g та відкалібрований за (3.1) сигнал акселерометру a_z , можна визначити кут нахилу ОДГ:

$$\varphi = a \tan \frac{a_z}{g} \quad (3.4)$$

1.4 Підключення акселерометра ADXL 335 до Arduino

На рис. 3.3 показано загальний вигляд аналогового мікромеханічного акселерометра ADXL 335. Нижче наведені його основні характеристики.

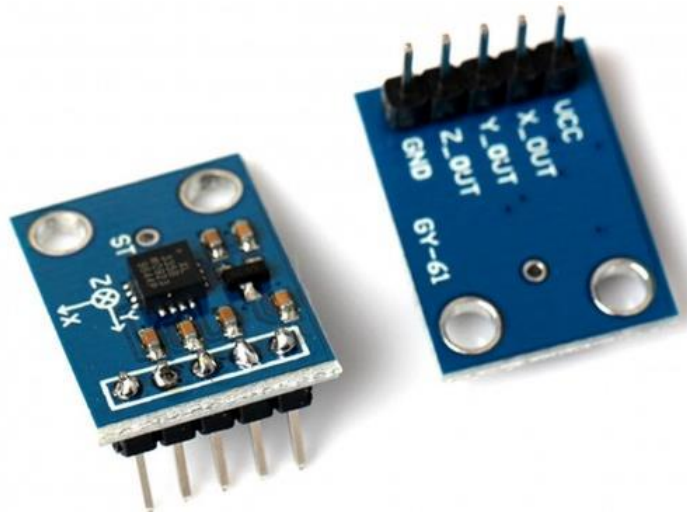


Рис.3.3 Акселерометр ADXL-335

Основні характеристики:

- Вимірювання по трьом осям;
- Мініатюрний пластиковий корпус LFCSP, 4 мм × 4 мм × 1.45 мм;
- Малий струм споживання: 350 мкА;
- Живлення від 1.8 В до 3.6 В;
- Ударні навантаження до 10000 g;
- Висока температурна стабільність;
- Регулювання ширини полоси за допомогою одного конденсатора на вісь;
- Відповідає вимогам RoHS/WEEE.

Підключення акселерометру виконувалося за допомогою мікроконтролера **Arduino Nano**.

Arduino Nano V3Nano – одна з найбільш мініатюрних плат Arduino. Вона є повним аналогом Arduino Uno – так само працює на чіпі ATmega328P (хоча можна ще зустріти варіанти з ATmega168), але з меншим форм-фактором. Через своїх габаритні розміри плата часто використовується в проектах, в яких важлива компактність. На платі відсутнє винесене гніздо зовнішнього живлення, Ардуіно працює через інтерфейс USB (miniUSB або microUSB).

Схема мікроконтролера приведена на рис.3.4

NANO/PINOUT

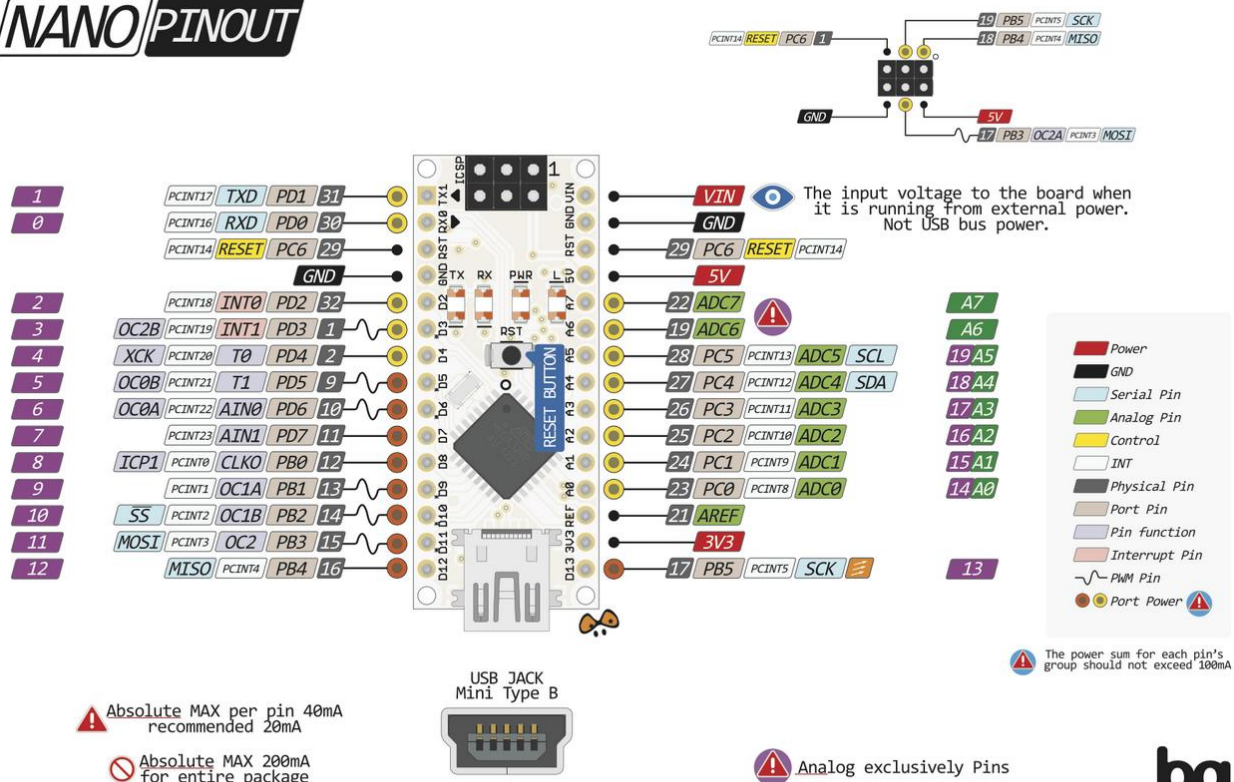


Рис.3.4 Arduino Nano

Схема підключення ADXL335 до плати Arduino Nano наведено нижче на рис.3.5.

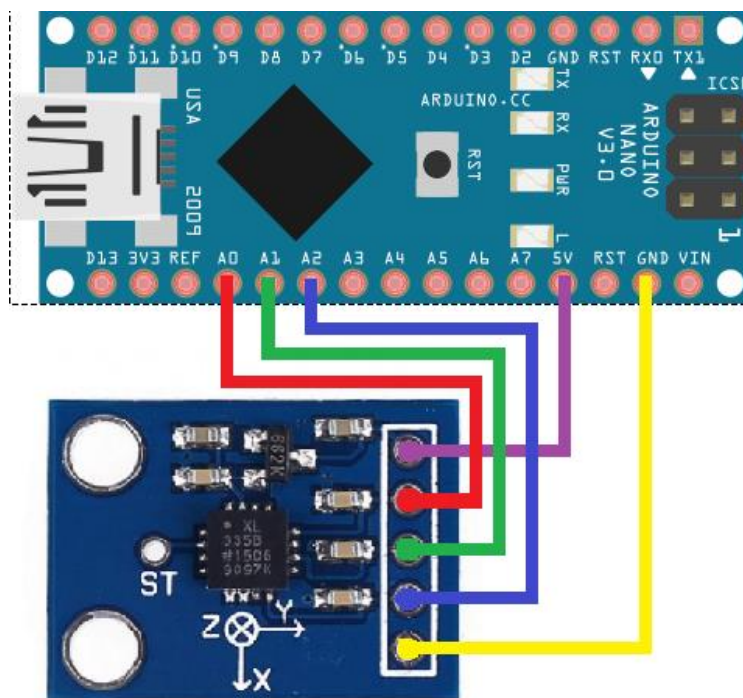


Рис. 3.5 Схема підключення

1.5 Програмне забезпечення

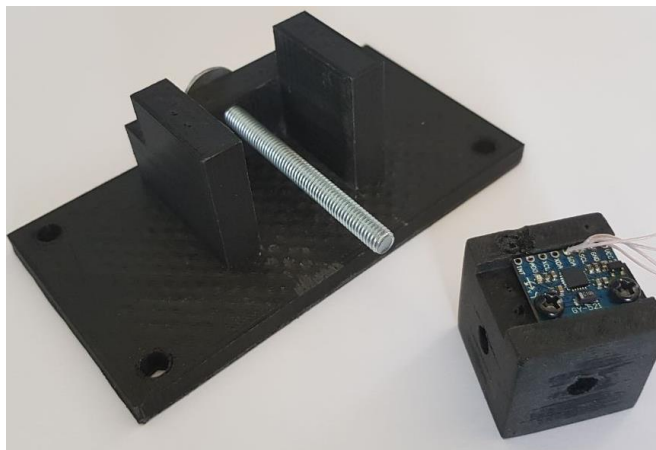
Для підключення акселерометру та отримання вихідного сигналу скористаємося програмним середовищем **Matlab**.

```
clc, clear all  
a = arduino('COM7', 'Nano');  
for i = 1:1:10e6  
    Uy(i)=readVoltage(a,'A1');  
end
```

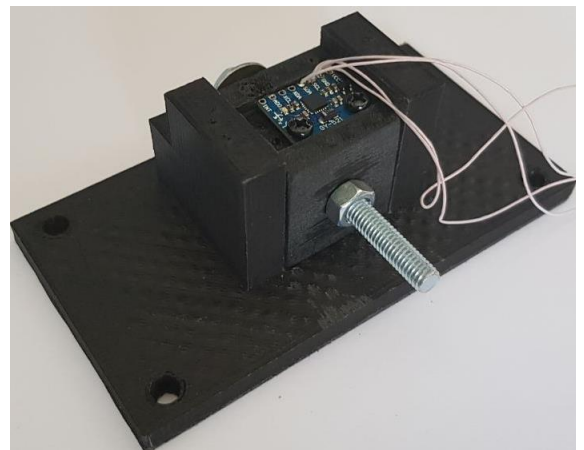
Приведена процедура забезпечує отримання аналогового сигналу за допомогою команди readVoltage з порту (A1).

1.6 Лабораторна установка

Лабораторна робота виконується на оптичній ділильній головці (ОДГ), яку показано на рис.3.6. – 3.7 Акселерометр встановлено на ОДГ за допомогою спеціальної оснастки.



а)



б)

Рис. 3.6. Чутливий елемент на оснастці

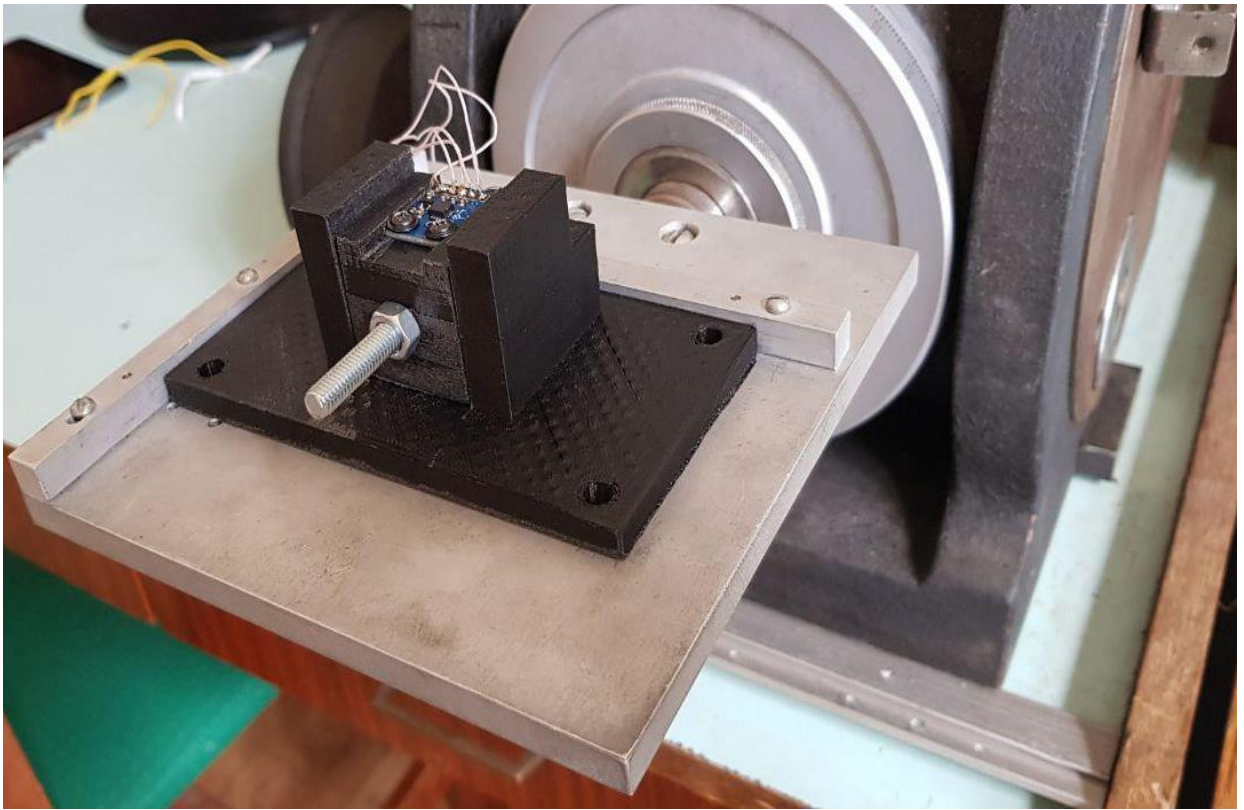


Рис.3.7 ОДГ за встановленим акселерометром

Використання оснастки дозволяє довільне положення осей чутливості акселерометру за вказівкою викладача.

2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Встановити акселерометр на платформі ОДГ.
2. Підключити акселерометр за схемою по рис.3.5;
3. Створити і зберегти новий проект у середовищі Matlab або Arduino;
4. Написати програму для Matlab або Arduino для отримання аналогового сигналу з акселерометру
5. Почати запис сигналу з акселерометра;
6. Виконати оберт платформи ОДГ навколо заданої викладачем осі на 90 град з кроком 10 град. При цьому, утримувати платформу ОДГ 10-20 секунд при кожному кроці повороту.
7. Припинити запис сигналу з акселерометра.
8. Розрахувати параметри акселерометра за (3.2) та (3.3);
9. Відкалібрувати акселерометр за (3.1).
10. Знайти кут нахилу ОДГ за (3.4)
11. Побудувати графік прискорення акселерометра при обертанні платформи. Побудувати відповідний графік зміни кута нахилу ОДГ.
12. Оформити звіт;

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке акселерометр? Його призначення ?
2. Які є типи акселерометрів ?
3. Як визначається кут між віссю чутливості акселерометра та площиною горизонту?
4. Особливості роботи і характеристики акселерометра ADXL335.
5. Схема підключення акселерометра ADXL335.

6. Як можна задати вимірювальну вісь акселерометра у програмному середовищі Matlab? Чи необхідно вказувати модель плати та номер порту при ініціалізації Arduino?
7. Що таке зміщення нуля і масштабний коефіцієнт акселерометра?
8. Від чого залежить точність визначення прискорення та кута акселерометром?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

ВИМІРЮВАННЯ ДОЦЕНТРОВОГО ПРИСКОРЕННЯ

Мета роботи: Формування програмного алгоритму для розрахунку доцентрового прискорення обертання основи за сигналами з мікромеханічного акселерометра.

Equation Section (Next)Equation Chapter (Next) Section 4

1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Мікромеханічний акселерометр

Акселерометр – прилад який вимірює проекцію уявного прискорення на свою вісь чутливості [2-3].

Кінематична схема осьового акселерометра зображена на рис.4.1. Тут позначені : 1 – корпус, 2 – демпфуюче середовище, 3 – інерційна маса або чутливий елемент акселерометра, 4,5 – пружний підвіс, вісь x – вісь чутливості.

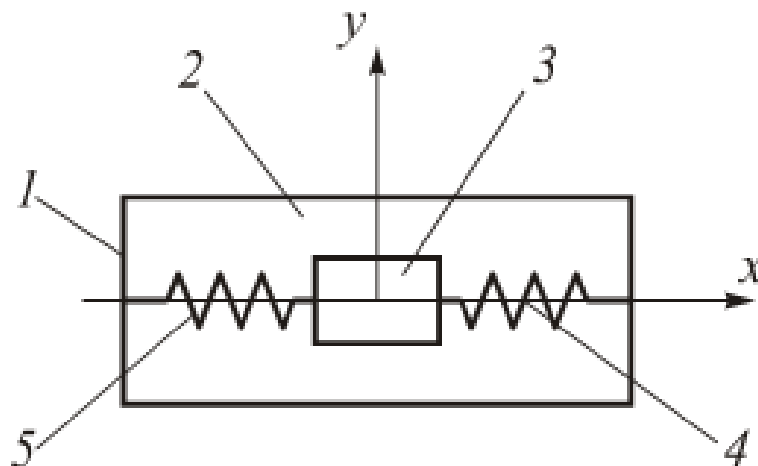


Рис.4.1 Схема осьового акселерометру

1.2 Модель вихідного сигналу датчика

Модель вихідного сигналу акселерометра можна спрощено записати у вигляді:

$$a = K^{-1}(U - U_0), \quad (4.1)$$

де позначено U – вихідна напруга акселерометра, K – масштабний коефіцієнт, U_0 – нульовий сигнал акселерометра.

Проведемо розрахунок масштабного коефіцієнта та зміщення нуля методом тестових поворотів.

$$K = \frac{(U_1 - U_2)}{2g}, \quad (4.2)$$

де U_1 та U_2 – напруга при додатному та від'ємному напрямі g ; g – прискорення вільного падіння.

Зміщення нуля можливо визначити за наступною формулою:

$$U_0 = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}{4}, \quad (4.3)$$

де U_i – напруга на кожному сегменті

1.3 Прискорення при обертальному русі основи

Акселерометр може вимірювати як лінійні, так і кутові прискорення. При обертальному русі основи на тіло діє дві складові прискорення: доцентрове (нормальне) та тангенціальне (дотичне).

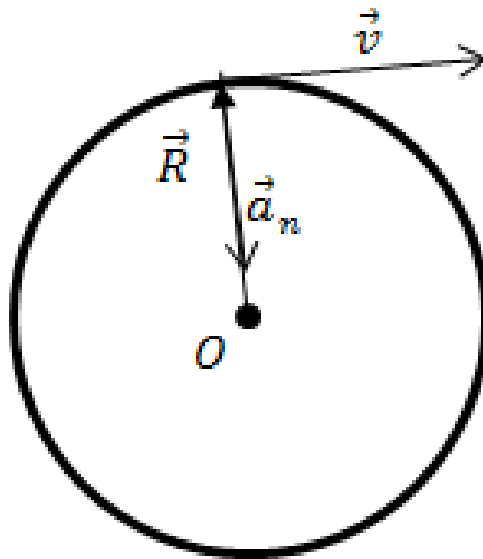


Рис. 4.2 Доцентрове прискорення

На рис.4.2 показано напрямок доцентрового прискорення, що діє на тіло яке обертається. Його величина залежить від швидкості обертання та відстані до осі:

$$a_n = \omega^2 R \quad (4.4)$$

Якщо встановити акселерометр на поворотний стіл і направити його вісь чутливості до центра обертання, то він буде вимірювати доцентрове прискорення $a_z = a_n$.

1.4 Підключення акселерометра ADXL 335 до Arduino

На рис. 4.3 показано загальний вигляд аналогового мікромеханічного акселерометра ADXL 335. Нижче наведені його основні характеристики.

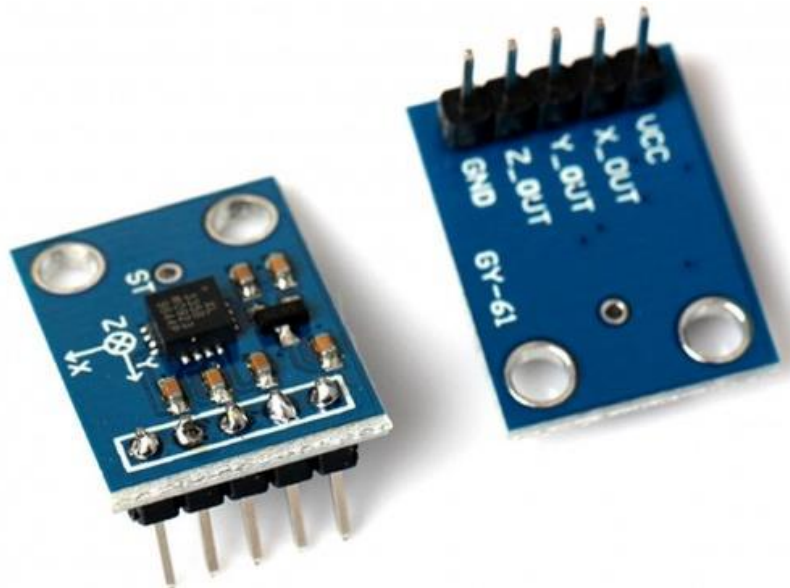


Рис.4.3 Акселерометр ADXL-335

Основні характеристики:

- Вимірювання по трьом осям;
- Мініатюрний пластиковий корпус LFCSP, 4 мм × 4 мм × 1.45 мм;
- Малий струм споживання: 350 мкА;
- Живлення від 1.8 В до 3.6 В;
- Ударні навантаження до 10000 g;
- Висока температурна стабільність;
- Регулювання ширини полоси за допомогою одного конденсатора на вісь;
- Відповідає вимогам RoHS/WEEE.

Підключення акселерометру виконувалося за допомогою мікроконтролера **Arduino Nano**.

Arduino Nano V3Nano – одна з найбільш мініатюрних плат Arduino. Вона є повним аналогом Arduino Uno – так само працює на чіпі ATmega328P (хоча можна ще зустріти варіанти з ATmega168), але з меншим форм-фактором. Через своїх габаритні розміри плата часто використовується в проектах, в яких важлива компактність. На платі відсутнє винесене гніздо зовнішнього живлення, Ардуіно працює через інтерфейс USB (miniUSB або microUSB).

Схема мікроконтролера приведена на рис.4.4

NANO/PINOUT

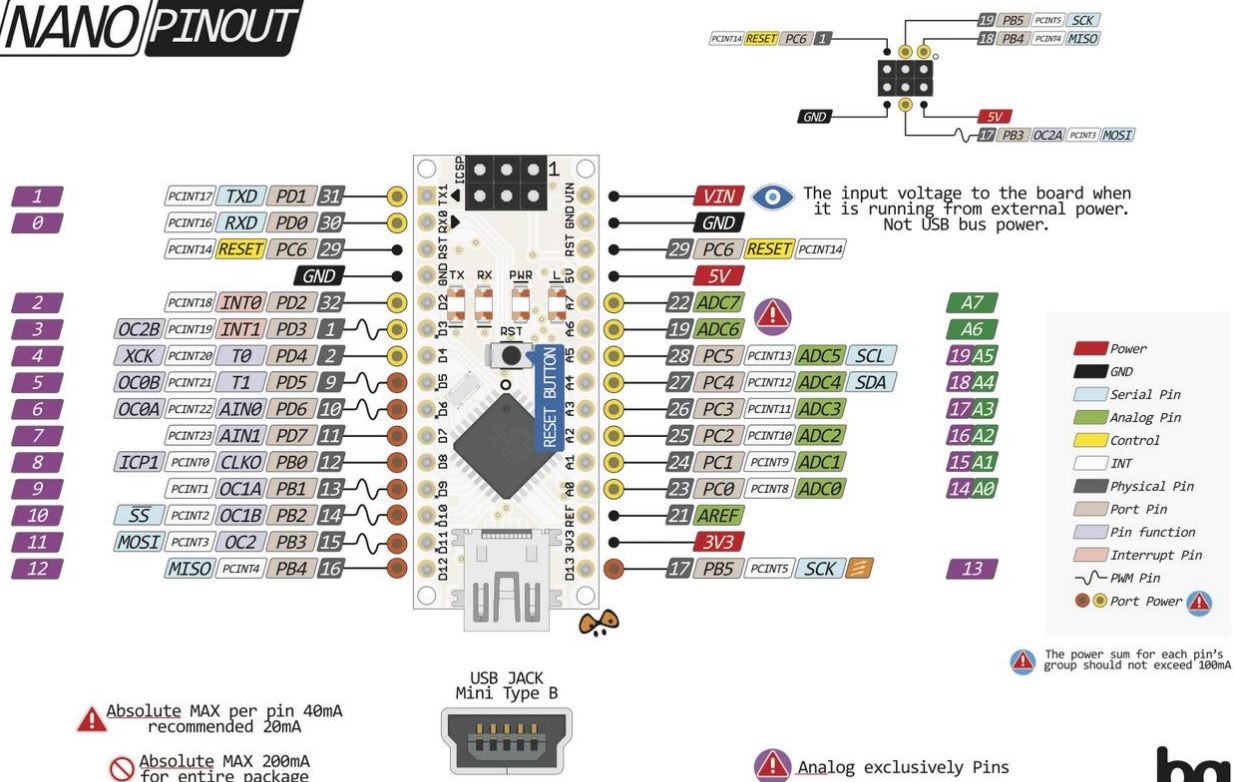


Рис.4.4 Arduino Nano

Схема підключення ADXL335 до плати Arduino Nano наведено нижче на рис.4.5.

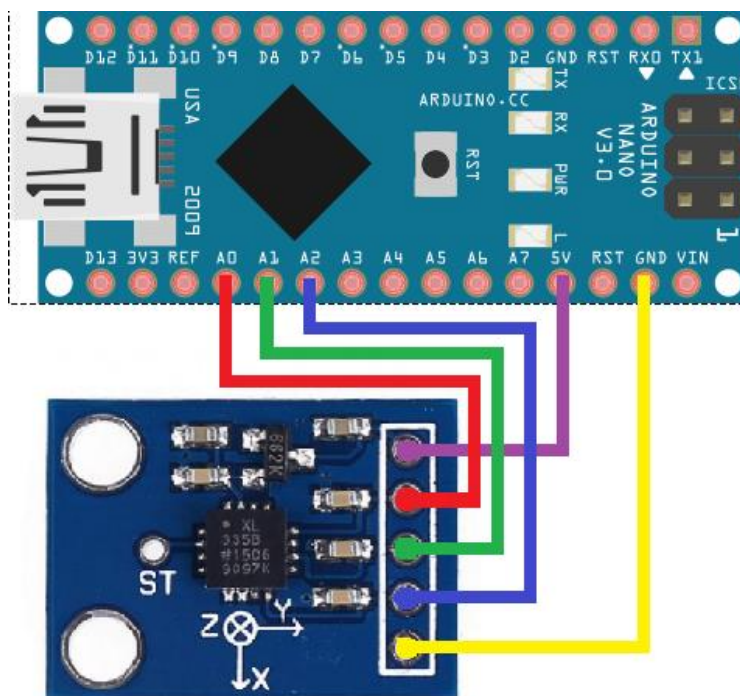


Рис. 4.5 Схема підключення

1.5 Програмне забезпечення

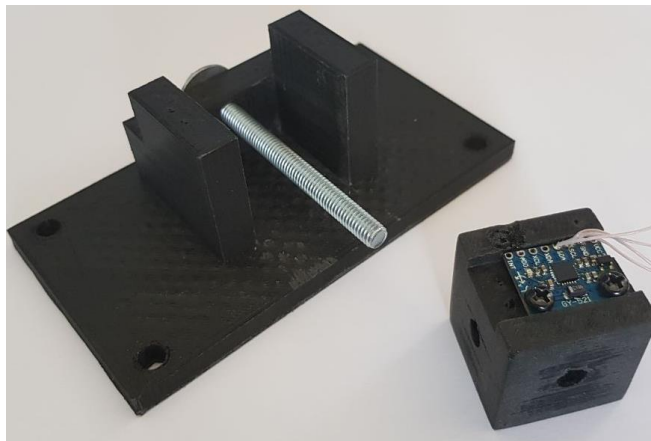
Для підключення акселерометру та отримання вихідного сигналу скористаємося програмним середовищем **Matlab**.

```
clc, clear all  
a = arduino('COM7', 'Nano');  
K = 0.0358;  
U0 = 1.7161;  
for i = 1:1:10e6  
    Uy(i)=readVoltage(a,'A1');  
    a_r(i) = (Uy(i) - U0)/K  
end
```

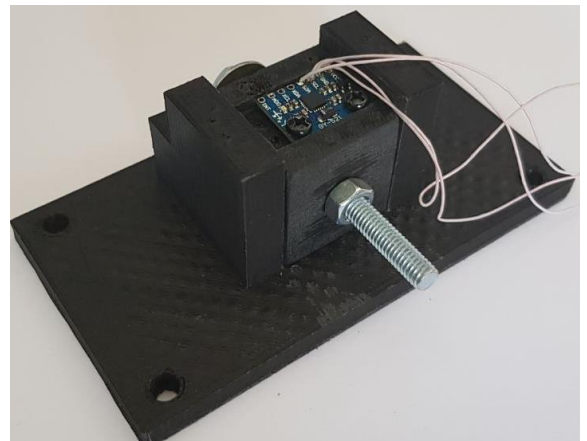
Приведена процедура забезпечує отримання аналогового сигналу за допомогою команди **readVoltage** з порту (A1).

1.6 Лабораторна установка

Лабораторна робота виконується на поворотному столі, яку показано на рис.4.6 – 4.7. Акселерометр встановлено на поворотному столі за допомогою спеціальної оснастки.



а)



б)

Рис. 4.6. Чутливий елемент на оснастці

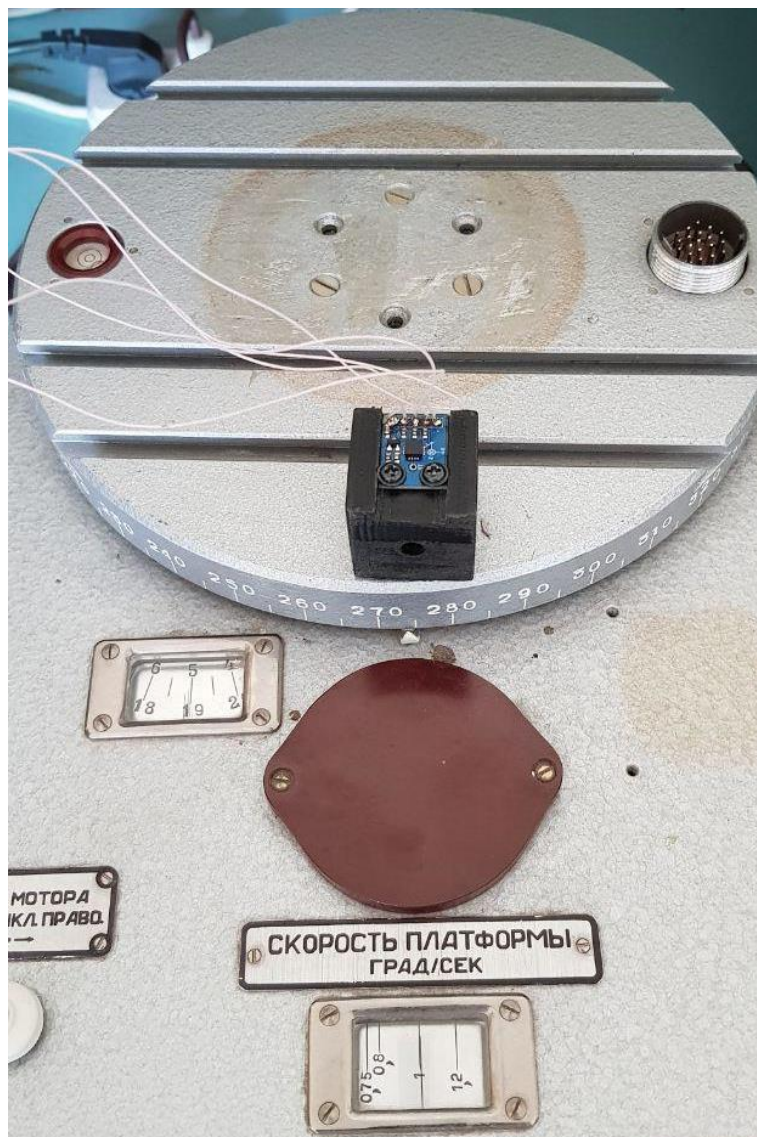


Рис.4.6 Акселерометр на поворотном столі

Використання оснастки дозволяє довільне положення осей чутливості акселерометру за вказівкою викладача.

2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Встановити акселерометр на поворотному столі за рис.4.6.
2. Підключити акселерометр за схемою по рис.4.5;
3. Створити і зберегти новий проект у середовищі Matlab або Arduino;
4. Написати програму для Matlab або Arduino для отримання аналогового сигналу з акселерометру;
5. Почати запис сигналу з акселерометра;
6. Встановити швидкість обертання поворотного столу, вказану викладачем. Визначити відстань від акселерометра до осі обертання. Запустити обертання поворотного стола.
7. Вимкнути обертання поворотного стола Припинити запис сигналу з акселерометра.
8. Відкалібрувати акселерометр за (4.1).
9. Визначити нормальне прискорення за (4.4).
10. Побудувати графік прискорення акселерометра при обертанні платформи. Порівняти отриманий результат із розрахованим теоретичним.
11. Оформити звіт;

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке акселерометр? Його призначення ?
2. Назвіть прискорення, що діють на тіло при обертальному русі основи.
3. Особливості роботи і характеристики акселерометра ADXL335.
4. Схема підключення акселерометра ADXL335.
5. Як можна задати вимірювальну вісь акселерометра у програмному середовищі Matlab? Чи необхідно вказувати модель плати та номер порту при ініціалізації Arduino?
6. Що таке зміщення нуля і масштабний коефіцієнт акселерометра?
7. Від чого залежить точність визначення прискорення акселерометром?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

ПІДКЛЮЧЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПА ЗА ДОПОМОГОЮ ARDUINO IDE

Equation Section (Next)

Мета роботи: ознайомлення з мікромеханічним інерціальним вимірювальним модулем MPU 6050; формування програмного алгоритму для підключення та отримання сигналів з гіроскопів MPU 6050 за допомогою Arduino IDE.

1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Мікромеханічний гіроскоп

Мікромеханічні гіроскопи – це електромеханічні системи, в яких енергія вимушених (первинних) коливань інерційної маси на пружному підвісі при появі переносної кутової швидкості перетворюється в енергію вторинних коливань, які містять інформацію про вимірювану кутову швидкість. Фактично мікромеханічний гіроскоп є датчиком кутової швидкості (ДКШ) [1-3].

1.2 Модель вихідного сигналу датчика

Модель вихідного сигналу гіроскопа можна спрощено записати у вигляді [2]:

$$\omega = K^{-1}(U - U_0), \quad (5.1)$$

де позначено U – вихідний сигнал гіроскопа, K – масштабний коефіцієнт, U_0 – нульовий сигнал гіроскопа, ω – кутова швидкість обертання гіроскопа.

Зміщення нуля можливо визначити у статичному режимі (при відсутності кутової швидкості). Для цього визначимо величину вихідного сигналу ММГ на нерухомій основі

$$U_0 = U_{\text{ст}}, \quad (5.2)$$

де $U_{\text{ст}}$ – сигнал у статичному режимі

Для розрахунку масштабного коефіцієнта ММГ необхідно отримати вихідний сигнал при обертанні основи зі сталою відомою кутовою швидкістю навколо осі чутливості:

$$K = \frac{U}{\omega}, \quad (5.3)$$

1.3 Підключення гіроскопа MPU6050 до Arduino

На рис.5.1 показано загальний вигляд інерціального вимірювального модуля (ІВМ) MPU6050. До складу MPU6050 входять тривісний акселерометр та гіроскоп.



Рис.5.1 Мікромеханічний ІВМ MPU6050

Основні характеристики:

- Програмований користувачем діапазон вимірювань: $\pm 250, \pm 500, \pm 1000$ і $\pm 2000^\circ / \text{сек}$ (градусів в секунду);
- Вбудований 16-розрядний АЦП;
- Нелінійність 0,2%;

- Підключення гіроскопу виконувалося за допомогою мікроконтролера **Arduino Nano**.

Схема мікроконтролера приведена на рис.5.2



Схема підключення MPU6050 до плати Arduino Nano наведено нижче на рис.5.3.

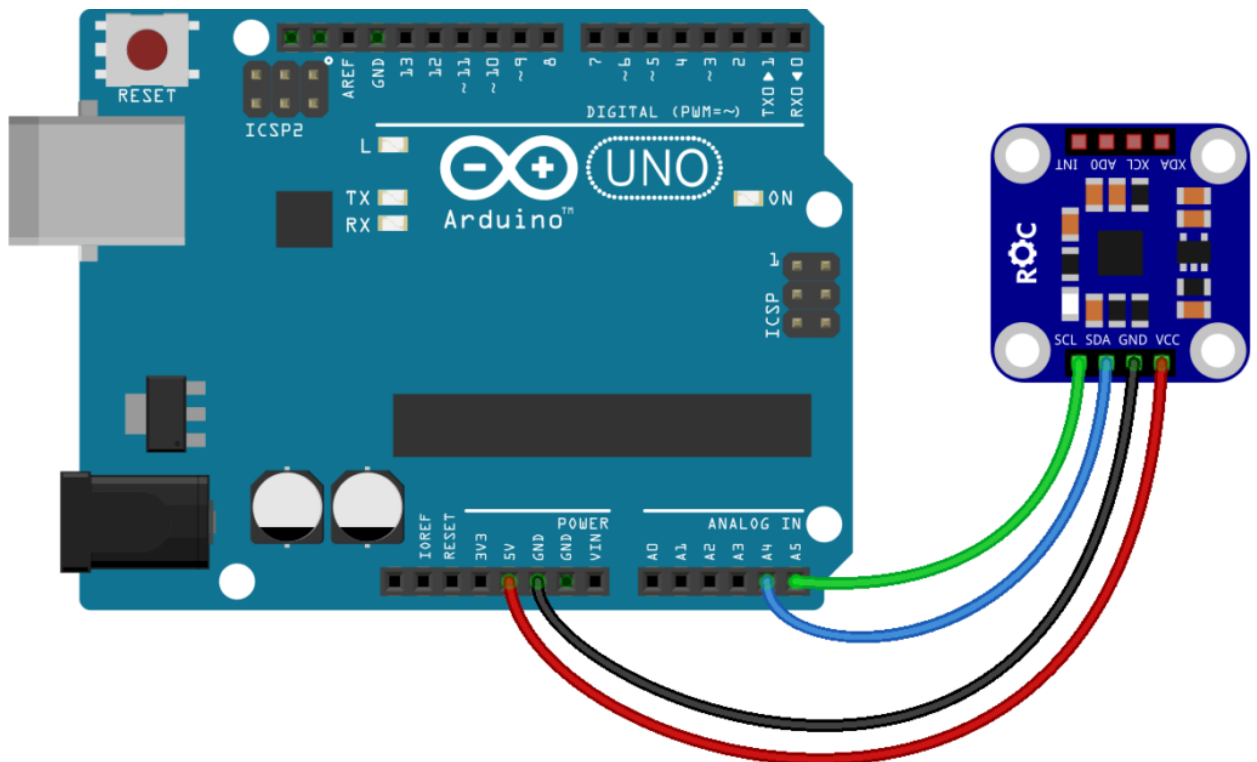


Рис.5.3 Схема підключення

1.4 Програмне забезпечення

Для підключення гіроскопу та отримання вихідного сигналу скористаємося програмним середовищем **Arduino IDE**. Нижче наведено приклад програмного алгоритму для підключення і отримання сигналу з IBM.

```
#include<Wire.h>
const int MPU_addr=0x68;  // I2C address of the MPU-
6050
int16_t AcX,AcY,AcZ,Tmp,GyX,GyY,GyZ;
void setup(){
  Wire.begin();
  Wire.beginTransmission(MPU_addr);
  Wire.write(0x6B);  // PWR_MGMT_1 register
  Wire.write(0);      // set to zero (wakes up the
MPU-6050)
  Wire.endTransmission(true);
```

```

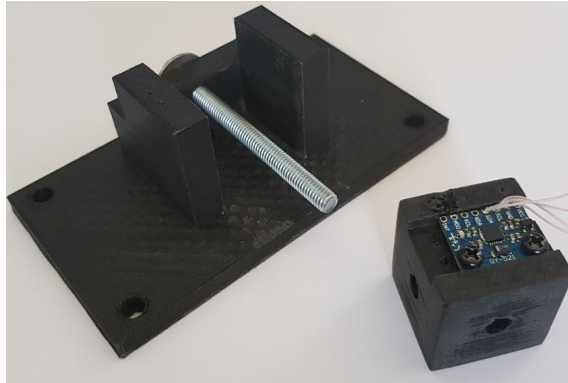
    Serial.begin(9600);
}
void loop(){
    Wire.beginTransmission(MPU_addr);
    Wire.write(0x3B); // starting with register 0x3B
    (ACCEL_XOUT_H)
    Wire.endTransmission(false);
    Wire.requestFrom(MPU_addr,14,true); // request a
total of 14 registers
    AcX=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x3B
    (ACCEL_XOUT_H) & 0x3C (ACCEL_XOUT_L)
    AcY=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x3D
    (ACCEL_YOUT_H) & 0x3E (ACCEL_YOUT_L)
    AcZ=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x3F
    (ACCEL_ZOUT_H) & 0x40 (ACCEL_ZOUT_L)
    Tmp=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x41
    (TEMP_OUT_H) & 0x42 (TEMP_OUT_L)
    GyX=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x43
    (GYRO_XOUT_H) & 0x44 (GYRO_XOUT_L)
    GyY=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x45
    (GYRO_YOUT_H) & 0x46 (GYRO_YOUT_L)
    GyZ=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x47
    (GYRO_ZOUT_H) & 0x48 (GYRO_ZOUT_L)
    //Serial.print("AcX = "); Serial.print(AcX);
    //Serial.print(" | AcY = "); Serial.print(AcY);
    //Serial.print(" | AcZ = "); Serial.print(AcZ);
    //Serial.print(" | Tmp = ");
Serial.print(Tmp/340.00+36.53); //equation for
temperature in degrees C from datasheet
    Serial.print(" "); Serial.print(GyX);
    Serial.print(" "); Serial.print(GyY);
    Serial.print(" "); Serial.println(GyZ);
    delay(333);
}

```

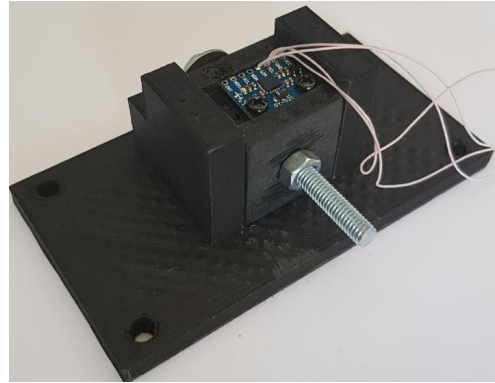
Використаний програмний алгоритм дозволяє отримувати повний пакет інформації з ІВМ: проекції прискорення та кутової швидкості, а також сигнал з термодатчика. При цьому «зчитування» сигналу відбувається шляхом опитування відповідних регістрів MPU6050.

1.6 Лабораторна установка

Лабораторна робота виконується на поворотному столі, яку показано на рис.5.4. – 5.5 IBM встановлено на поворотному столі за допомогою спеціальної оснастки.



а)



б)

Рис. 5.4. Чутливий елемент на оснастці

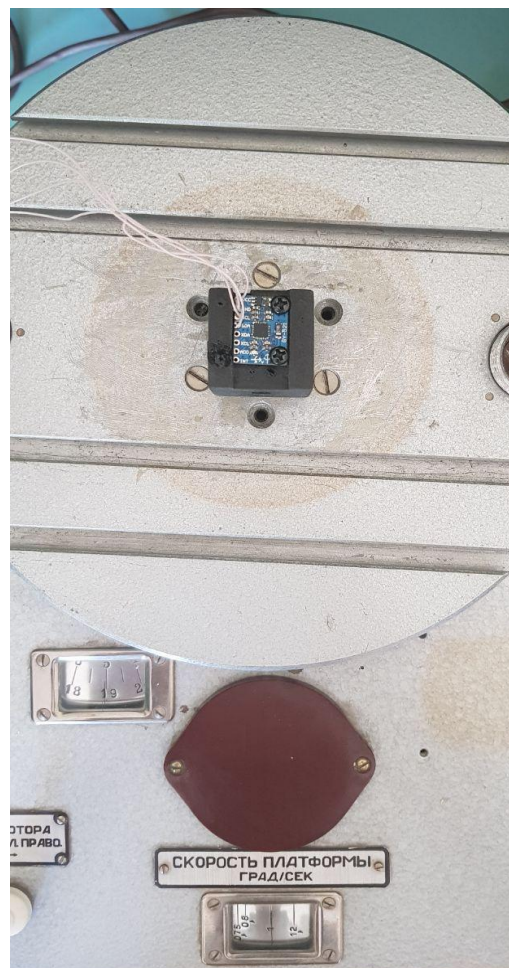


Рис. 5.4 MPU6050 на поворотному столі

2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Встановити ІВМ на поворотному столі.
2. Підключити ІВМ за схемою по рис.5.3;
3. Створити і зберегти новий проект у середовищі Arduino;
4. Написати програму для Arduino для отримання сигналу з ІВМ MPU6050;
5. Почати запис сигналу з ІВМ;
6. Встановити швидкість обертання поворотного столу, вказану викладачем. Закріпити ІВМ на поворотному столі. Запустити обертання поворотного стола.
7. Вимкнути обертання поворотного стола Припинити запис сигналу з ІВМ.
8. Відкалібрувати гіроскоп за (5.2) та (5.3).
9. Побудувати графік вихідної величини гіроскопа при обертанні установки. Побудувати відповідний графік зміни кутової швидкості.
- 10.Оформити звіт;

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке мікромеханічний гіроскоп? Його призначення? Схеми побудови.
2. Особливості роботи і характеристики ІВМ MPU6050.
3. Схема підключення ІВМ MPU6050 до Arduino.
4. Як можна задати вимірювальну вісь гіроскопа у програмному середовищі Arduino IDE? За допомогою якої команди отримується сигнал із заданої осі?
5. Що таке зміщення нуля і масштабний коефіцієнт гіроскопа?
6. Від чого залежить точність визначення кутової швидкості?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ПІДКЛЮЧЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПА ЗА ДОПОМОГОЮ MATLAB

Мета роботи: ознайомлення з мікромеханічним інерціальним вимірювальним модулем MPU 6050; формування програмного алгоритму для підключення та отримання сигналів з гіроскопів MPU 6050 за допомогою Matlab.

1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Equation Section (Next)

1.1 Мікромеханічний гіроскоп

Мікромеханічні гіроскопи – це електромеханічні системи, в яких енергія вимушених (первинних) коливань інерційної маси на пружному підвісі при появі переносної кутової швидкості перетворюється в енергію вторинних коливань, які містять інформацію про вимірювану кутову швидкість [1-3].

1.2 Модель вихідного сигналу датчика

Модель вихідного сигналу ММГ можна спрощено записати у вигляді [2]:

$$\omega = K^{-1}(U - U_0), \quad (6.1)$$

де позначено U – вихідний сигнал гіроскопа, K – масштабний коефіцієнт, U_0 – нульовий сигнал гіроскопа, ω – кутова швидкість гіроскопа.

Зміщення нуля можливо визначити у статичному режимі (при відсутності кутової швидкості). Для цього визначимо величину вихідного сигналу ММГ на нерухомій основі

$$U_0 = U_{\text{ст}}, \quad (6.2)$$

де $U_{\text{ст}}$ – сигнал у статичному режимі

Для розрахунку масштабного коефіцієнта ММГ необхідно отримати вихідний сигнал при обертанні основи зі сталою кутовою швидкістю навколо осі чутливості

$$K = \frac{U}{\omega}, \quad (6.3)$$

1.2 Підключення гіроскопа MPU6050 до Arduino

На рис. показано загальний вигляд інерціального вимірювального модуля (ІВМ) MPU6050. До складу MPU6050 входять тривісний акселерометр та гіроскоп.



Рис. 6.1 Мікромеханічний ІВМ MPU6050

Основні характеристики:

- Програмований користувачем діапазон вимірювань: $\pm 250, \pm 500, \pm 1000$ і $\pm 2000^\circ / \text{сек}$ (градусів в секунду);
- Вбудований 16-розрядний АЦП;
- Нелінійність 0,2%;
- Струм в режимі роботи - 3,6 мА;
- Струм в режимі очікування - 5 мкА.
- Інтерфейс для запису і читання регістрів пристрою, що працює на частоті до 400 кГц, в стандартному режимі до 100 кГц;

- На платі встановлені резистори для SDA і SCL ліній;
- Два отвори під гвинт діаметром 3 мм.

Підключення гіроскопу виконувалося за допомогою мікроконтролера **Arduino Nano**.

Arduino Nano V3Nano – одна з найбільш мініатюрних плат Arduino. Вона є повним аналогом Arduino Uno – так само працює на чіпі ATmega328P (хоча можна ще зустріти варіанти з ATmega168), але з меншим форм-фактором. Через своїх габаритні розміри плата часто використовується в проектах, в яких важлива компактність. На платі відсутнє винесене гніздо зовнішнього живлення, Ардуіно працює через інтерфейс USB (miniUSB або microUSB).

Схема мікроконтролера приведена на рис.

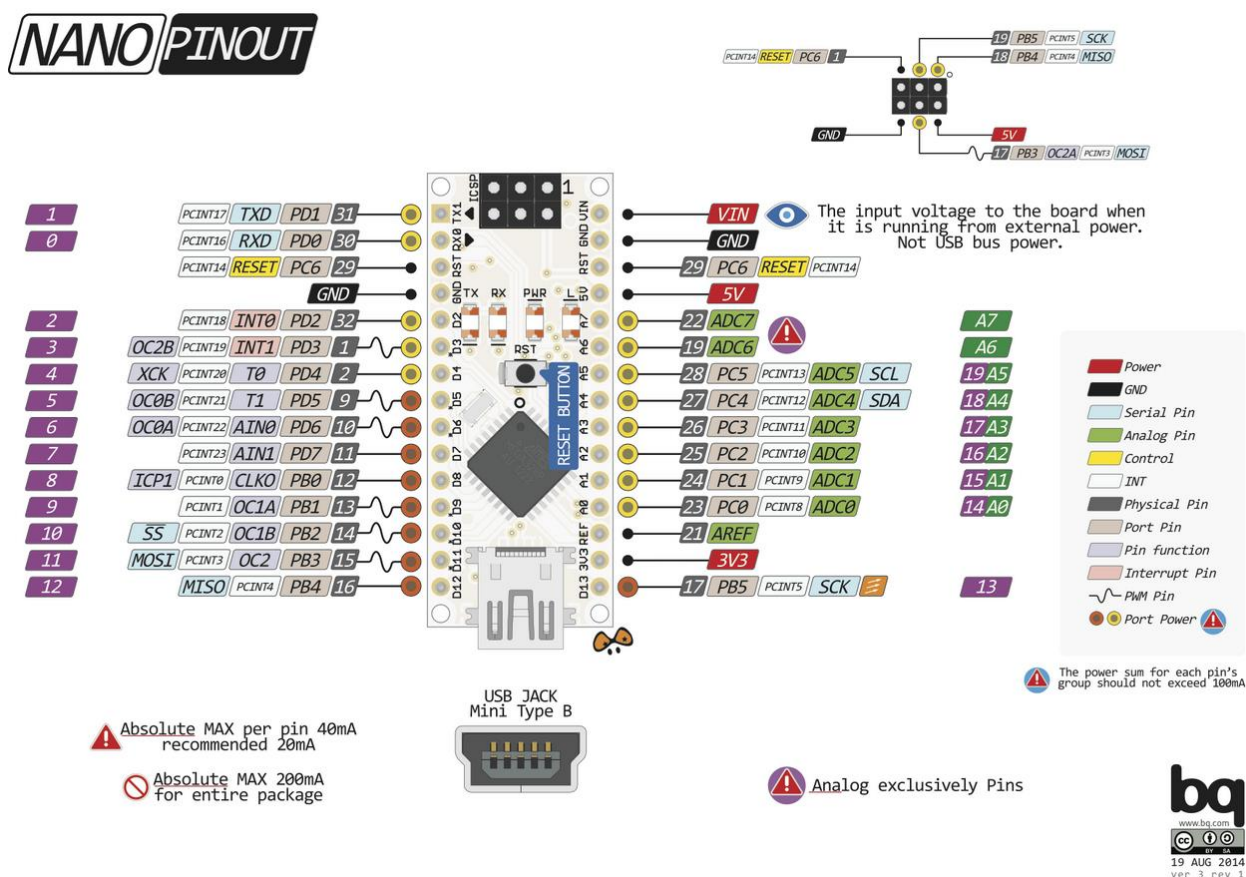


Рис. 6.2 Arduino Nano

Схема підключення MPU6050 до плати Arduino Nano наведено нижче на рис. 6.3.

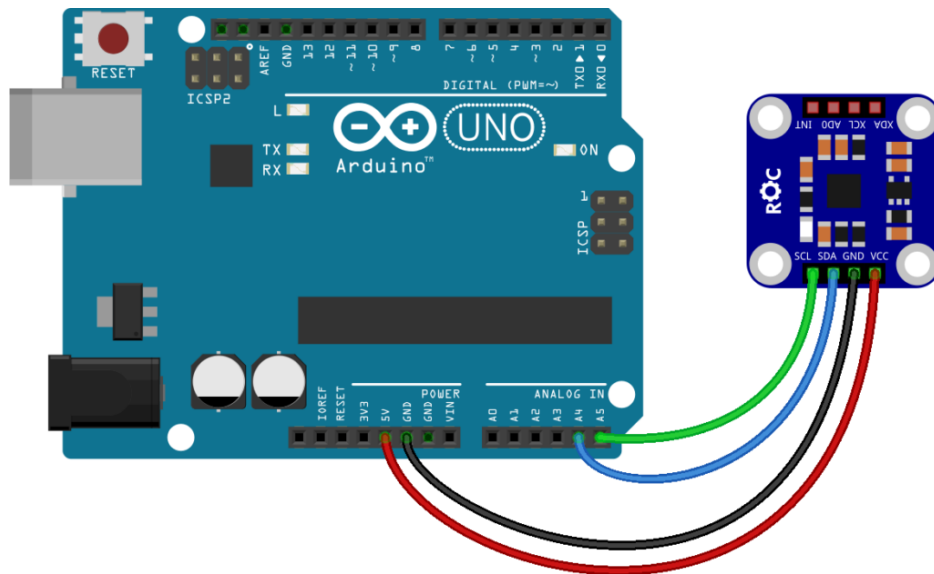


Рис. 6.3 Схема підключення

1.3 Програмне забезпечення

Для підключення гіроскопу та отримання вихідного сигналу скористаємося програмним середовищем **Matlab**.

```
clear all
hold all
a=arduino('COM7','Nano3');
mpu=i2cdev(a,'0x68'); %mpu adress is normally 0x68
writeRegister(mpu,      hex2dec('B6'),      hex2dec('00'),
'int16'); %reset
zeros(10000,6,'int8'); %prelocating for the speed
j=1;
a1 = animatedline('Color',[1 0 0]);
a2 = animatedline('Color',[0 1 0]);
a3 = animatedline('Color',[0 0 1]);
legend('Gyro_x','Gyro_y','Gyro_z')
while(true)
    x=1;
    for i=67:72 % 14 Data Registers for Accel,Temp,Gyro
        data(j,x)= readRegister(mpu, i, 'int8')
        x=x+1;
    end
    y=swapbytes(typecast(data(j,:), 'int16')); %if your
system is big-endian remove the swapbytes function
    addpoints(a1,j,double(y(1)));
```

```

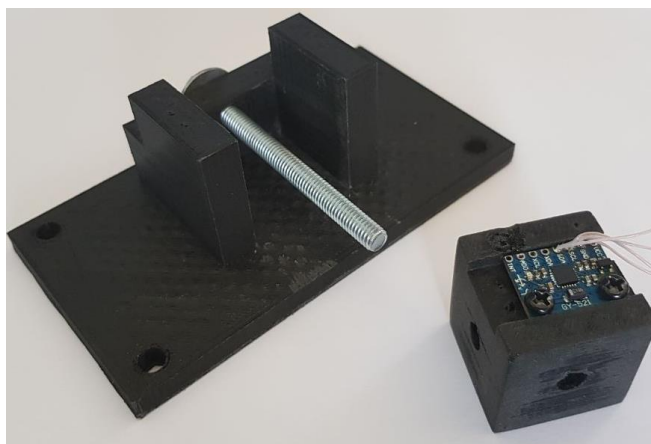
addpoints(a2,j,double(y(2)));
addpoints(a3,j,double(y(3)));
j=j+1;
drawnow limitrate
end

```

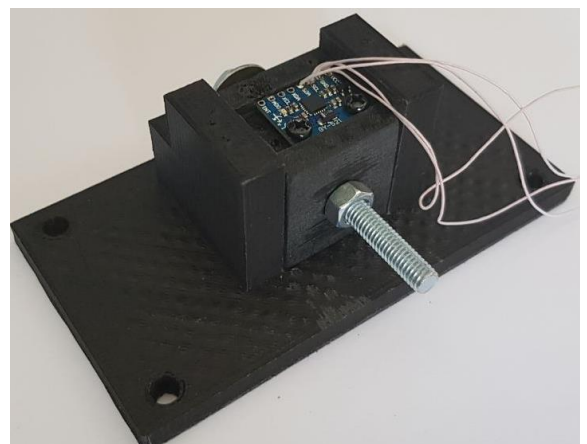
Використаний програмний алгоритм дозволяє отримувати повний пакет інформації з ІВМ: проекції прискорення та кутової швидкості, а також сигнал з термодатчика. При цьому «зчитування» сигналу відбувається шляхом опитування відповідних регістрів MPU6050.

1.4 Лабораторна установка

Лабораторна робота виконується на поворотному столі, яку показано на рис.6.4 – 6.5 ІВМ встановлено на поворотному столі за допомогою спеціальної оснастки.



а)



б)

Рис. 6.5. Чутливий елемент на оснастці

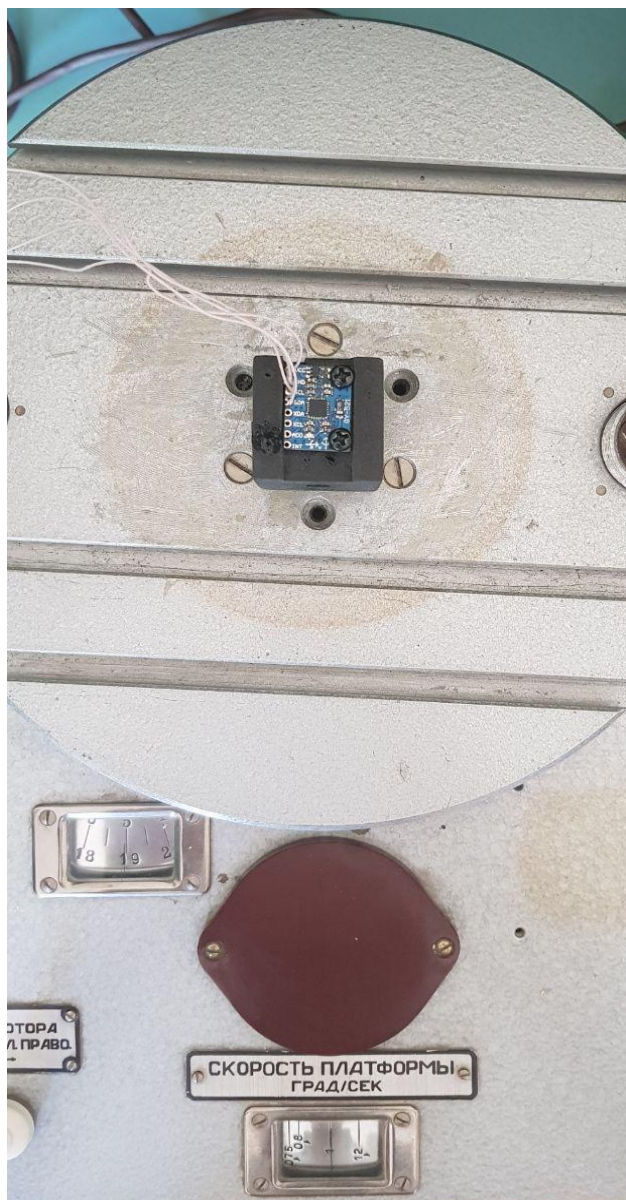


Рис. 6.4 MPU6050 на поворотном столе

2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ:

1. Встановити ІВМ на поворотному столі.
2. Підключити ІВМ за схемою по рис.;
3. Створити і зберегти новий проект у середовищі Matlab;
4. Написати програму для Matlab для отримання сигналу з ІВМ MPU6050;
5. Почати запис сигналу з ІВМ;
6. Встановити швидкість обертання поворотного столу, вказану викладачем. Закріпити ІВМ на поворотному столі. Запустити обертання поворотного стола.
7. Вимкнути обертання поворотного стола Припинити запис сигналу з ІВМ.
8. Відкалібрувати гіроскоп за та.
9. Побудувати графік вихідної величини гіроскопа при обертанні установки. Побудувати відповідний графік зміни кутової швидкості.
10. Оформити звіт;

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке мікромеханічний гіроскоп? Його призначення? Схеми побудови.
2. Особливості роботи і характеристики ІВМ MPU6050.
3. Схема підключення ІВМ MPU6050 до Arduino.
4. Як можна задати вимірювальну вісь гіроскопа у програмному середовищі Matlab? За допомогою якої команди отримується сигнал з ІВМ?
5. Що таке зміщення нуля і масштабний коефіцієнт гіроскопа?
6. Від чого залежить точність визначення кутової швидкості?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

МОДЕЛЮВАННЯ ОСЬОВОГО МІКРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Equation Section 7

Мета роботи: ознайомлення з конструкцією і принципом роботи осьового мікромеханічного акселерометра; розрахунок конструктивних параметрів; моделювання акселерометра при різному русі основи.

1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Математична модель

Кінематична схема акселерометра наведена на рис.7.1

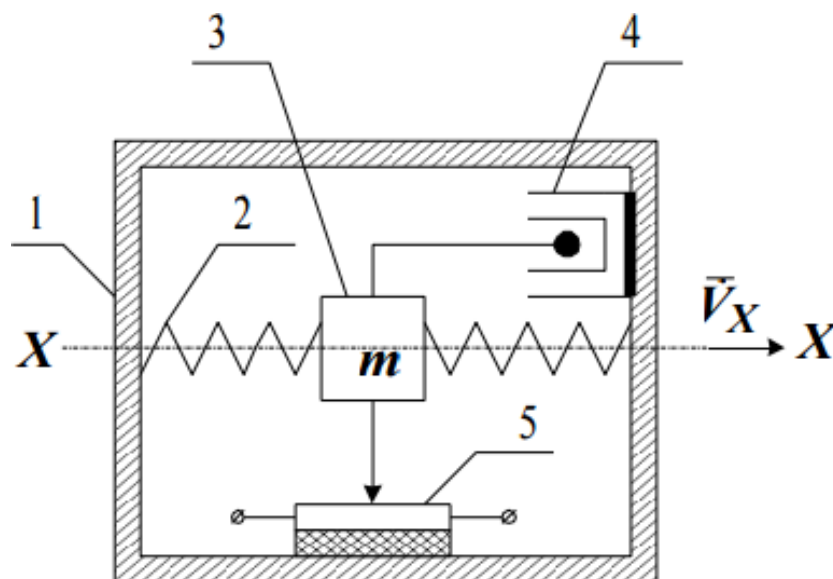


Рис.7.1 Осьовий акселерометр

На ній позначено 1 – корпус; 2 – пружини підвісу; 3 – чутливий елемент – інерційна маса; 4 – повітряний демпфер; 5 – потенціометричний перетворювач.

Спрощена математична модель осьового мікроакселерометра [2] наведена нижче

$$m\ddot{x} + f\dot{x} + cx = -ma_x \quad (7.1)$$

де f – коефіцієнт демпфування, m – маса чутливого елемента акселерометра, c – коефіцієнти жорсткості пружного підвісу, a_x – проекція уявного прискорення на вісь чутливості.

1.2 Конструктивна схема

У якості конструктивної схеми було обрано реальний акселерометр, зображений на рис.7.2 [2].

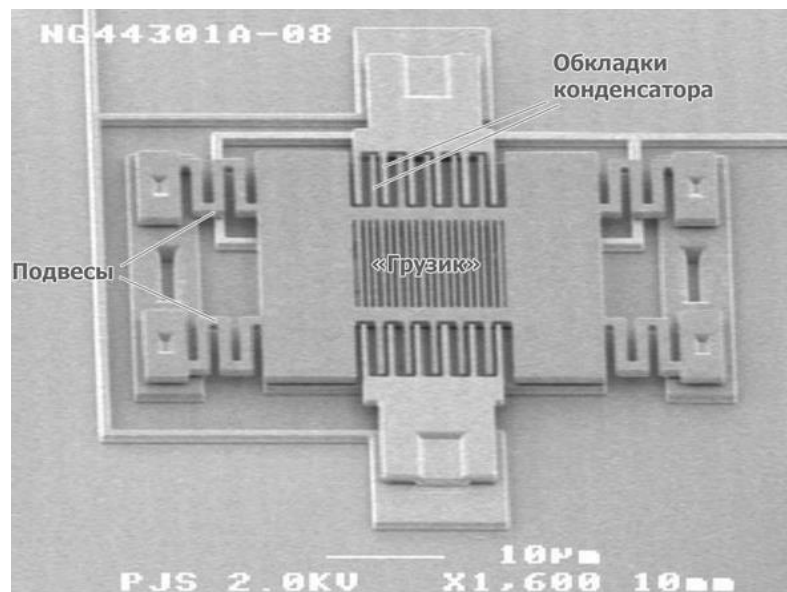


Рис.7.2 — MEMC акселерометр

На основі акселерометра на рис.7.2 у середовищі SolidWorks було створено тривимірну модель приладу, приведену на рис.7.3.

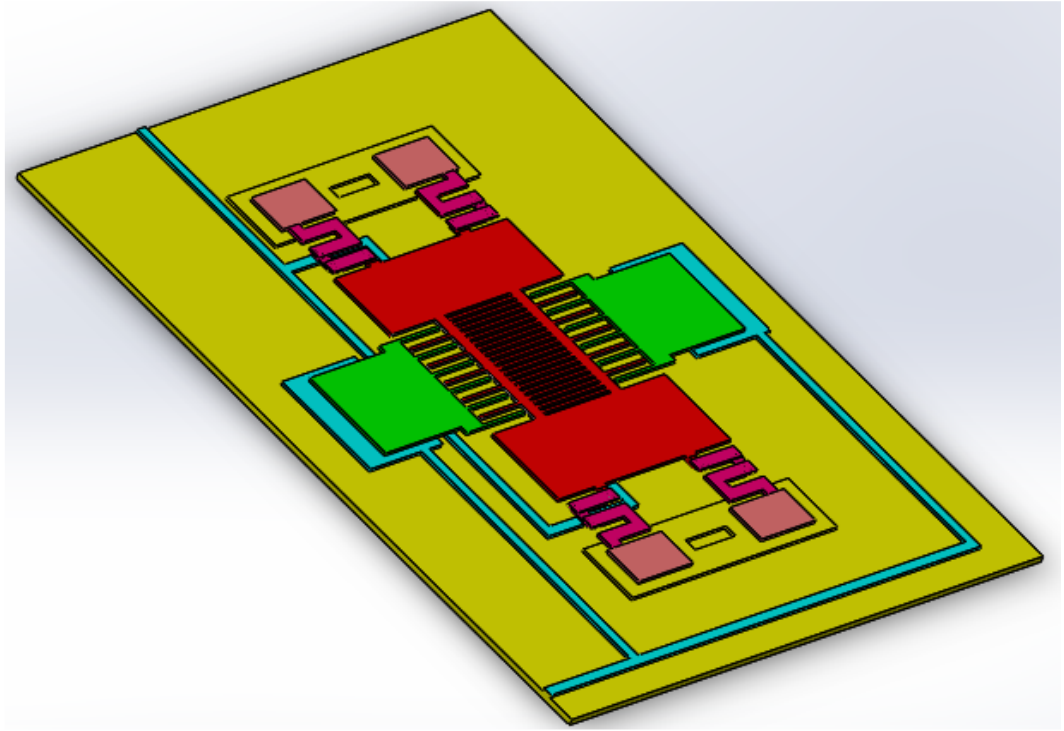


Рис.7.3 Тривимірна модель акселерометра

Програмна модель одновісного лінійного акселерометра побудована у середовищі Matlab, використовуючи функцію *ode45* та Simulink. У якості математичної моделі будемо використовувати рівняння осьового акселерометра (7.1). Структурна схема програмної моделі представлена нижче на рис.7.4. [4]

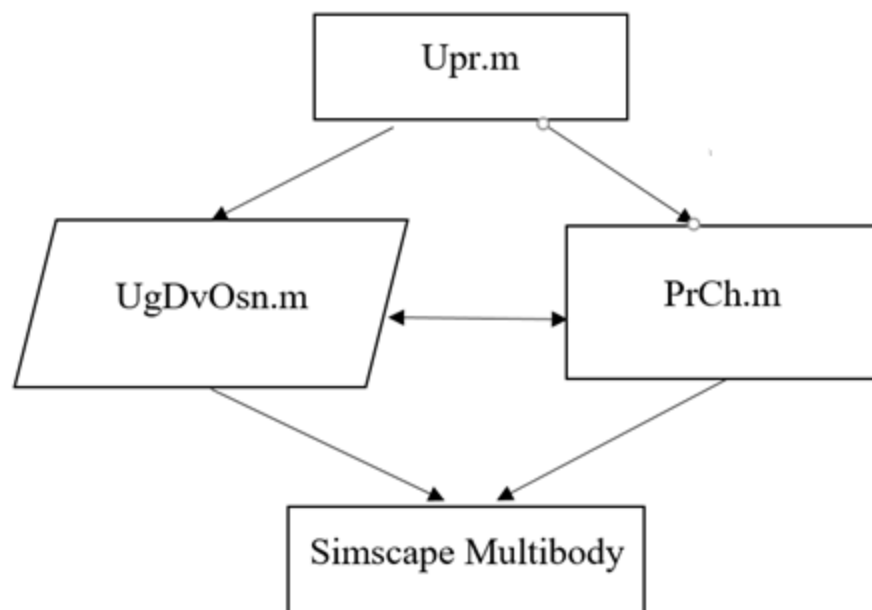


Рис.7.4 Структура програмної моделі акселерометра

Головною є керувальна програма **Upr.m**. В ній задаються параметри чутливого елемента та руху основи. Спочатку виконується ввід параметрів акселерометра таких як коефіцієнт демпфування, маса, жорсткість підвісу. Параметри руху основи: прискорення, частота коливань та амплітуда.

Чисельне інтегрування рівняння (7.1) проводиться у середовищі Matlab Simulink з використання S-function. Ця стандартна процедура дозволяє об'єднати інтерфейс Simulink з можливістю формування програми правих частин у вигляді коду у Matlab.

Для роботи S-function необхідно у якості вхідних величин використовувати об'єкти Simulink, тому прискорення основи формується використовуючи блок SinWave. В ньому задаються необхідні параметри лінійного прискорення.

Отриманий після інтегрування вихідний вектор виводиться на екран у вигляді графіків у керувальній програмі.

Створену тривимірну модель осявого акселерометра, показану на рис.7.3, можна імпортувати до середовища Simulink, використовуючи доповнення Simscape Multibody. Завдяки цьому можна проводити дослідження акселерометра не тільки інтегруючи диференційні рівняння руху, а й спостерігати поведінку моделі чутливого елемента у реальному часі.

Програмна модель акселерометра у середовищі Simulink за імпортованою моделлю Simscape Multibody представлена на рис. 7.5. [4]

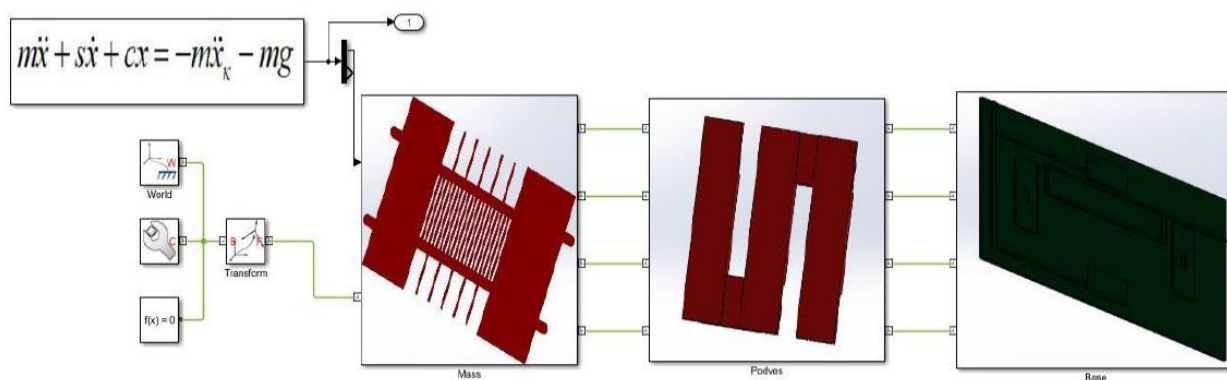


Рис.7.5. Програмна модель у Simscape Multibody

2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Запустити програмну модель акселерометра у середовищі Matlab.
2. За тривимірною моделлю акселерометра визначити жорсткість пружного підвісу та коефіцієнт демпфування.
3. Варіюючи величиною постійної складової лінійного прискорення, визначити усталене переміщення інерційної маси. Побудувати результуючий графік залежності усталеного переміщення від величини прискорення основи.
4. Варіюючи величиною амплітуди і частоти прискорення, визначити амплітуду і частоту переміщень ІМ акселерометра. Побудувати результуючі графіки залежності амплітуди і частоти ІМ акселерометра від прискорення основи.
5. Встановити постійне прискорення основи. Варіюючи величиною коефіцієнта демпфування акселерометра визначити час закінчення перехідного процесу. При цьому розрахувати частоту власних коливань акселерометра.
6. Оформити результати у вигляді протоколу дослідження.

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке осьовий акселерометр? Його призначення ?
2. Рівняння руху осьового МА?
3. Особливості конструкції осьового МА?
4. В якій програмі задаються параметри чутливого елемента та руху основи? Яким чином це виконується?
5. Де задаються параметри лінійного прискорення?
6. Завдяки чому можна спостерігати поведінку моделі чутливого елемента у реальному часі?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПА

Мета роботи: ознайомлення з конструкцією і принципом роботи мікромеханічного гіроскопа LL-типу; розрахунок конструктивних параметрів; моделювання гіроскопа при різному русі основи.

1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Equation Section 8

1.1 Математична модель

На рис.8.1 представлено схему двомасового мікромеханічного гіроскопа LL-типу. Первинні коливання збуджуються по осі x , а при повороті основи з кутовою швидкістю ω навколо осі z , виникають вторинні коливання по осі y . Лінійні коливання інерційних мас можна описати системами диференціальних рівнянь [1].

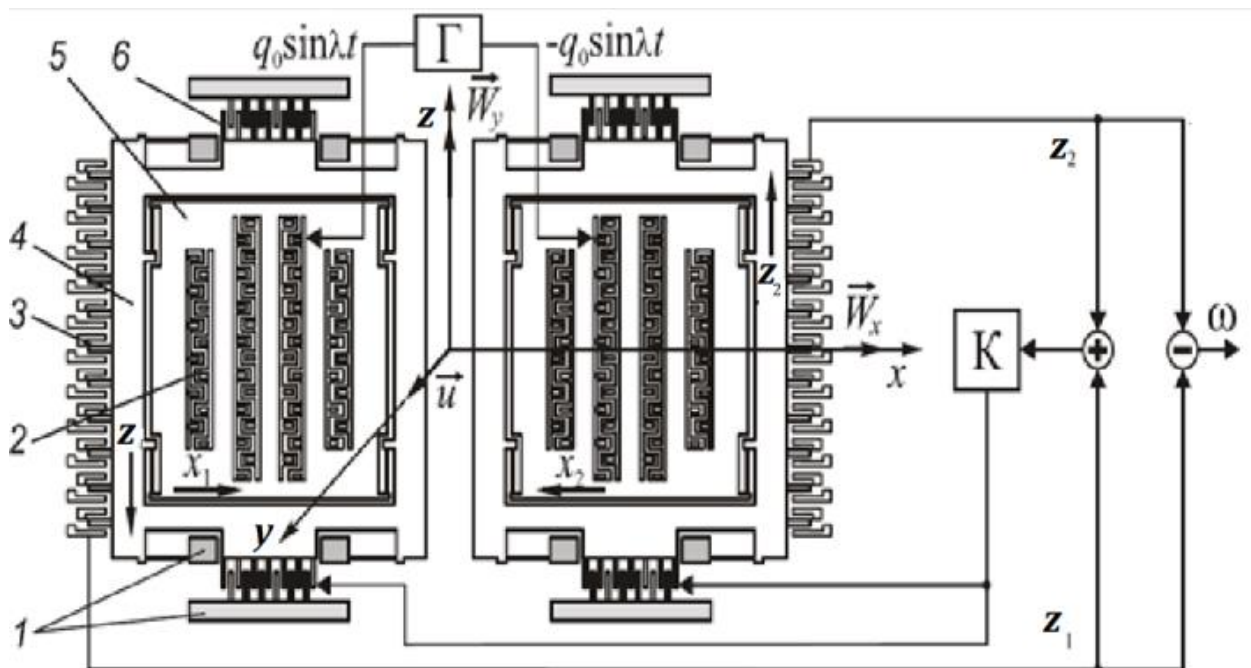


Рис. 8.1. Мікромеханічний датчик із системою зворотного зв'язку: 1 – основа, 2 – система збудження; 3 – ємнісний датчик; 4 – рамки; 5 – інерційні маси; 6 – силові компенсатори.

Приведемо рівняння руху одномасового гіроскопа.

$$\begin{aligned}\ddot{x} + 2h_1\dot{x} + \left[k_1^2 - (u_{Yc}^2 + u_{Zc}^2) \right] x + 2u_{Yc}\dot{z} + u_{Xc}u_{Zc}z &= q_1 \\ \ddot{z} + 2h_2\dot{z} + \left[k_2^2 - (u_{Yc}^2 + u_{Xc}^2) \right] z - 2u_{Yc}\dot{x} - u_{Xc}u_{Zc}x &= q_2\end{aligned}\quad (8.1)$$

де $2h_1 = f_1 / m$; $2h_2 = f_2 / m$; $k_1^2 = c_1 / m$; $k_2^2 = c_2 / m$; $q_1 = Q_1 / m$; $q_2 = Q_2 / m$.

Припустимо, що інерціальні маси і пружні елементи двомасового гіроскопа виготовлені ідентичними, тоді його динаміка буде описуватись двома системами. При чому амплітуда первинних коливань другої ІМ має протилежний знак.

1.2 Конструктивна схема

Було розроблено тривимірну модель двомасового мікромеханічного гіроскопа L-L типу у середовищі SolidWorks. Зазначимо, що в конструкцію впроваджено додатковий пружний елемент, що пов'язує рухомі рамки і дозволяє синхронізувати частоти коливань інерційних мас. Конструкція створена з наближеними розмірами чутливих елементів. На рис. представлено тривимірну модель ММГ L-L типу [5].

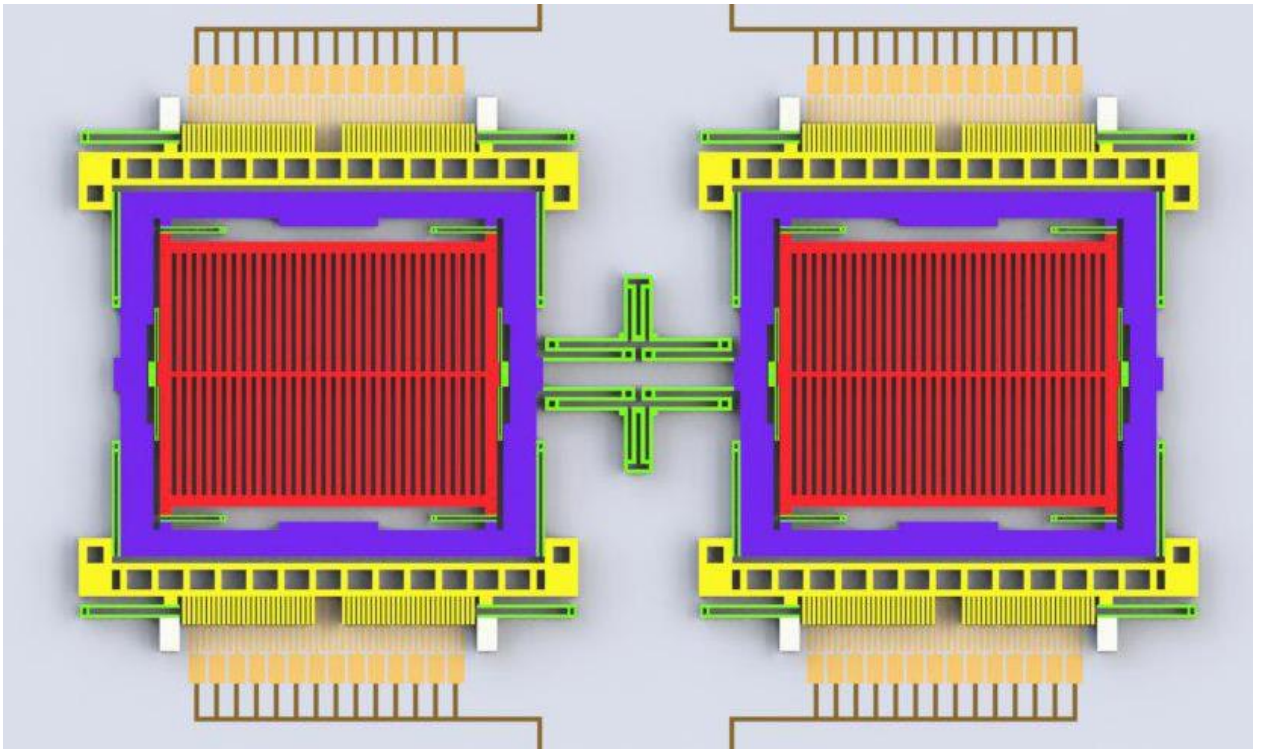


Рис. 8.2 Макет гіроскопа

Побудуємо програмну модель двомасового мікромеханічного гіроскопа L-L типу у середовищі Matlab та Simulink. Схема програмної моделі представлена нижче на рис. 8.3 [5].

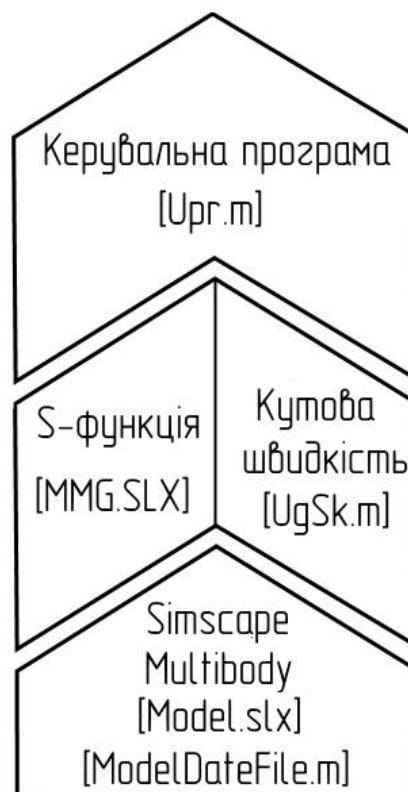


Рис. 8.3 Програмна модель

Пояснимо роботу окремих компонентів моделі. Головною є керувальна програма **Upr.m**. В ній задаються параметри чутливого елемента та руху основи, реалізується процес інтегрування диференціальних рівнянь, взаємозв'язок окремих функцій та виведення результатів.

Чисельне інтегрування рівняння (8.1) проводиться у середовищі Matlab Simulink з використання S-функції **MMG_S.m**. Ця процедура дозволяє об'єднати інтерфейс Simulink з можливістю формування функції правих частин у вигляді коду в Matlab.

Проекції кутової швидкості розраховуються функцією **UgSk.m** та імпортуються до Simulink за допомогою блока Interpreted Matlab Function.

Для наочності моделювання, імпортуємо створену у SolidWorks 3D модель гіроскопа до середовища Matlab–Simulink, використовуючи Simscape Multibody Link Plug-In. За допомогою нього формується XML файл, що містить інформацію про тривимірні об'єкти, взаємозв'язки та прив'язки моделі гіроскопа.

В результаті отримуємо програмну модель двомасового ММГ, що поєднує в собі можливість інтегрувати диференціальні рівняння руху у Matlab–Simulink та одночасно спостерігати за рухом 3D моделі ЧЕ. Simulink модель представлена на рис. 8.4 [5].

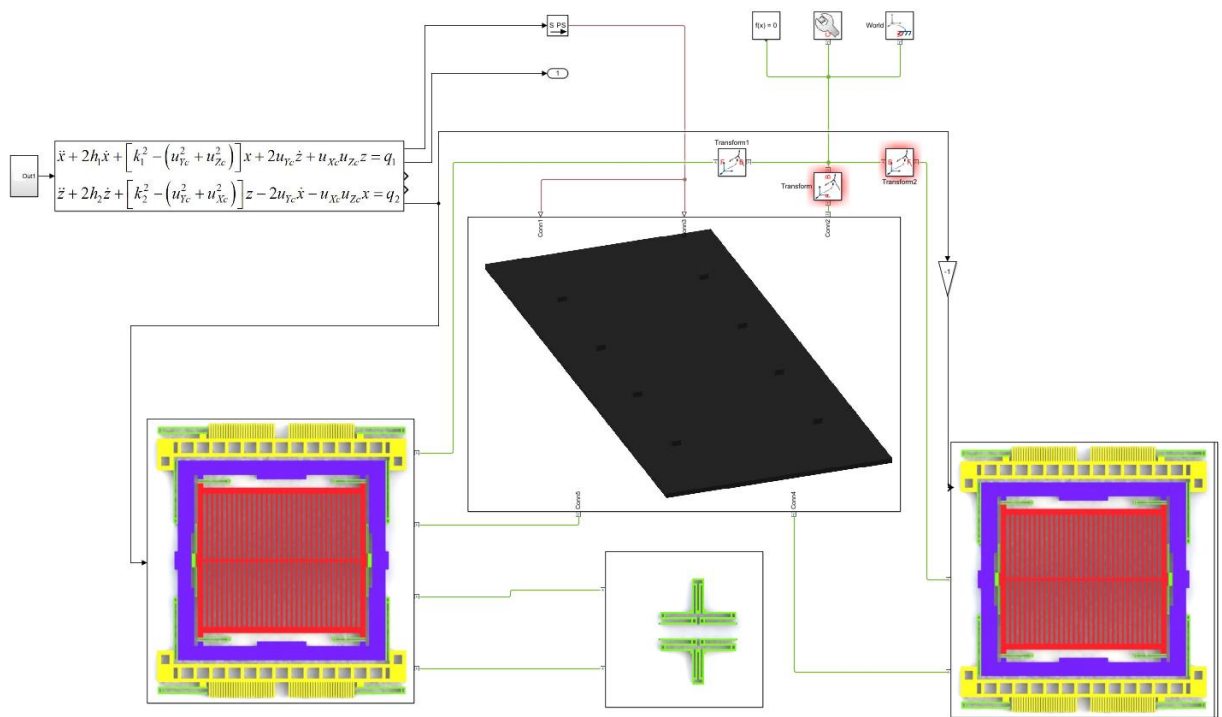


Рис. 8.4 Програмна модель ММГ у Simulink

2.ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Запустити програмну модель гіроскопа у середовищі Matlab.
2. За приведеною тривимірною моделлю гіроскопа розрахувати жорсткості пружного підвісу та демпфування.
3. Варіюючи величиною постійної складової кутової швидкості основи, визначити амплітуду вторинних коливань.
4. Варіюючи величиною амплітуди прискорення основи, визначити зміщення (сталу складову) вторинних коливань гіроскопа.
5. Оформити результати у вигляді протоколу дослідження.

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке мікромеханічний гіроскоп? Його призначення? Схеми побудови.
2. Рівняння руху ІВМ?
3. Особливості конструкції ІВМ?
4. По яких осях виникають первинні і вторинні коливання?
5. В якій програмі реалізується процес інтегрування диференціальних рівнянь?
6. Для чого потрібне чисельне інтегрування рівнянь?
7. Який файл містить інформацію про взаємозв'язки моделі гіроскопа?

ВИСНОВКИ

В даному методичному забезпеченні ми ознайомили студентів з MEMS-акселерометром та гіроскопом, принципами їх роботи, підключенням до ПК та пояснили алгоритм отримання вихідних сигналів у середовищах Matlab та Arduino IDE. В ході виконання роботи використовувались сучасні інерціальні MEMS датчики, проводилось імітаційне моделювання, а також створено необхідне програмне забезпечення для проведення циклу лабораторних робіт. Лабораторні роботи можуть використовуватися у навчальному процесі кафедри.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лазарєв Ю. Ф. Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації: підруч. [Текст]/ Ю. Ф. Лазарєв, П. М. Бондар – К.: НТУУ «КП», 2011. – 644с.
2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007.- 400с.:ил.
3. Сысоева С. Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения //Компоненты и технологии. – 2014. – №. 6.
4. Губенко Г.Є. Мікромеханічний акселерометр. [Дипломна робота на отримання ступеня «бакалавр»]. – К.: "КПІ імені Ігоря Сікорського", 2018. – 60 с.
5. Медведчук Ю.О. Мікромеханічний гіроскоп. [Дипломна робота на отримання ступеня «бакалавр»]. – К.: "КПІ імені Ігоря Сікорського", 2018. – 64 с.